

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки

«На правах рукопису»
УДК 621.383

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка

на тему: Формування тривимірного зображення в нелінійному середовищі _____

Виконав (-ла): студент (-ка) __2__ курсу, групи ДП-71 мн
(шифр групи)

Зозюк Максим Олегович _____ (підпис)
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник проф. доц., к.т.н. Орлов А.Т. _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант з нормоконтролю проф. доц., к.т.н. Орлов А.Т.

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент зав. Каф. ЕІ, д.т.н., проф., В.І. Тимофеев _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____ (підпис)

Київ – 2019 року

Реферат

Актуальність теми Технології формування тривимірного зображення використовуються у різних областях людської діяльності – медицина, розваги, наукові дослідження і тд.

На даний момент існує велика кількість різних методик по створенню тривимірного зображення – голографічний метод, голограмні методи, акустичні методи і інші. Найбільшу популярність набувають голограмні методи, які в своїй суті створюють ілюзію тривимірного зображення за допомогою методів накладання світлових хвиль та швидко змінюють кадри для ефекту тривимірності.

Також, швидко розвиваються матеріали для запису голограм за допомогою голографічного методу. Такі матеріали, як сегнетоелектрики, фоторефрактивні кристали, композити та органічні матеріали розвиваються на даний час в багатьох лабораторіях світу. Особливу увагу привертає властивість нелінійних матеріалів з кубічною поляризацією, а саме самодифракція та перспектива в формуванні динамічної голографії.

Голограмні методи, які використовують стисле повітря, обертання екрану, автостереоскопію, автомультископію та інше, використовуються вже на даний час, і дають змогу отримати досвід тривимірного зображення в нормальних умовах – без спеціальних окулярів, середовища, місць спостереження.

Органічні фоторефрактивні матеріали мають час реакції близько від секунд до мікросекунд, що робить їх важливими для динамічної голографії в нормальних умовах і які можна буде використовувати в промисловому виробництві.

Метою цієї роботи є формування тривимірного зображення за допомогою програмного забезпечення 3Ds Max, Movavi Video Suite, а також огляд сучасних технологій в області формування тривимірного зображення в нелінійних середовищах.

Структура і об'єм роботи.

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 98 сторінок. Робота включає 65 рисунка, 2 таблиць, список використаної літератури з 30 найменувань.

Апробація результатів дисертації проводилась в конференції та публікації наукової статті. Перелік представлено нижче.

М.О. Zoziuk. Analysis of the properties of some photorefractive organic materials for dynamic holography (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”)./ Зозюк М.О.. Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «ХІМІЯ, ФІЗИКА ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНІ» і семінар «СИНТЕЗ ТА ЗАСТОСУВАННЯ БІОСУМІСНИХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕТАЛІВ», Київ

М.О. Zoziuk. Augmented Reality and Augmented Virtuality (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”). / Зозюк М.О.. II Міжнародна науково-практична конференція «Наука та концепції», Київ

Ключові слова: голограмма, голографія, фоторефрактивні кристали, органічні кристали.

Abstract

Actuality of theme. Technologies of forming a three-dimensional image are used in various areas of human activity - medicine, entertainment, scientific research, and so on.

At present, there are a large number of different techniques for creating a three-dimensional image - the holographic method, hologram methods, acoustic methods, and others. Hologram methods are the most popular, which in their essence create an illusion of three-dimensional images by means of methods of overlaying light waves and quickly changing frames for the effect of three-dimensional.

Also, materials for writing holograms using the holographic method are rapidly developing. Materials such as ferroelectrics, photorefractive crystals, composites, and organic materials are currently being developed in many laboratories around the world. Particular attention is paid to the property of nonlinear materials with cubic polarization, namely, self-diffraction and the perspective in the formation of dynamic holography.

Hologram techniques that use compressed air, rotation of the screen, auto-stereoscopy, auto-multiscopy, etc., are already in use and give the opportunity to get the experience of a three-dimensional image under normal conditions - without special glasses, the environment, places of observation.

Organic photorefractive materials have a reaction time of about seconds to microseconds, which makes them important for dynamic holography under normal conditions and which can be used in industrial production.

The purpose of this work is to create a three-dimensional image using 3Ds Max, Movavi Video Suite, as well as an overview of the prospects for developing a three-dimensional image area in nonlinear environments.

Structure and volume of work.

The work consists of an introduction, five sections, conclusions and a list of used sources. The total volume of the dissertation is 98 pages. The work includes 65 drawings, 2 tables, a list of used sources of 30 titles.

Approval of the results of the dissertation was carried out in a conference and publication of a scientific article. The list is listed below.

M.O. Zoziuk. Analysis of the properties of some photorefractive organic materials for dynamic holography (National Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute). / Zozyuk M.O. All-Ukrainian conference with international participation "CHEMISTRY, PHYSICS AND TECHNOLOGY OF SURFACE" and seminar "SYNTHESIS AND APPLICATION OF BIO-SUSTAINED NANOSYSTEMS BASED ON METALS », Kyiv

Key words: hologram, holography, photorefractive crystals, organic crystals.

ВСТУП

Актуальність теми. Тривимірне зображення в останній час набуває широкого розвитку за рахунок відкриття нових матеріалів з нелінійними властивостями. Різні методи формування тривимірного зображення дали сильний поштовх для створення різних технологій, які використовуються в багатьох сферах, таких як – медицина, сфера розваг, експериментальна фізика, побут та інше. В різних наукових лабораторіях зібрані результати досліджень великої кількості матеріалів з нелінійними властивостями. Основні проблеми пов'язані із: складністю створення таких систем, щоб їх можливо було використовувати в промисловому виробництві, формуванням композитних матеріалів (які складаються з нелінійних матеріалів), які мають всі потрібні характеристики, та зручних методів формування тривимірного зображення. В цій роботі будуть представлені сучасні методи та матеріали для формування тривимірного зображення.

Не дивлячись на те, що на даний момент існує велика кількість робіт присвячених технологіям, матеріалам, методам формування тривимірного зображення в різного виду середовищах, ця область не має не стоїть на місці, а отже потребує широкого погляду на весь об'єм інформації, яка існує на даний час. Виходячи з цього, виникає потреба в об'єднанні всієї існуючої інформації по данній тематиці для ознайомлення широкої та наукової публіки з останніми досягненнями в данній області та, звичайно, аналізу данної області та її перспектив в майбутньому.

Метою цієї роботи є формування тривимірного зображення за допомогою програмного забезпечення 3Ds Max, Movavi Video Suite, а також огляд сучасних технологій в області формування тривимірного зображення в нелінійних середовищах.

Об'єкт дослідження – сучасні технології формування тривимірного зображення в нелінійних середовищах та їхні перспективи.

Предмет дослідження – технологічні властивості даних технологій та перспективи програмного забезпечення 3Ds Max для створення повнопрофільованих анімацій для створення тривимірного зображення.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувались сучасні інформаційні джерела, такі як – springer, dou, uspto, sciencedirect та інші. Для створення анімації та відео – голограми було використано – 3Ds Max, Movavi Video Suite, Microsoft Paint, Microsoft Scissors, FumeFX.

Наукова новизна одержаних результатів.

Спостережено «справжність» псевдо-голограми в різних форматах відео, таких як – всі чотири сторони – один вид анімації; всі чотири сторони – різні види анімації; всі чотири сторони – чотири види накладені один на один.

Практичне значення одержаних результатів.

Об'єднано всю існуючу інформацію в області формування тривимірного зображення в нелінійних середовищах та їхні перспективи в майбутньому для різних прикладних задач.

РОЗДІЛ 1. ПРИРОДА ЯВИЩ В НЕЛІНІЙНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

1.1. Основи нелінійної оптики

При викладі явищ нелінійної оптики, передбачається незалежність основних характеристик середовища - показника заломлення та показника поглинання від інтенсивності падаючого випромінювання. Ця незалежність виражається в принципі суперпозиції: вплив на речовина декількох полів дорівнює сумі всіх впливів кожного поля окремо.

Враховуючи дипольний момент кожного атома, при дії електричного поля береться сума всіх дипольних моментів атомів. Явища нелінійної оптики зв'язані з явищем **ефекту насичення**, коли величина напруженості електричного поля більша або близька до напруженню пробою середовища. Такі параметри середовища, як відносна провідність перестає бути константою. Для різних речовин ця величина різна.

Для опису явищ нелінійної оптики припускається, що поле, яке діє на середовище невелике порівняно з напругою пробою, і дипольний момент середовища розкладається в ряд по компонентам напруженості і дипольного моменту:

$$P_i = \chi_{ij} E_j + \chi_{ijk} E_j E_k + \chi_{ijkl} E_j E_k E_l + \dots \quad (1)$$

$$P_i = P_i^{(1)} + P_i^{(2)} + P_i^{(3)} + \dots, \quad (2)$$

Найбільший інтерес представляє **квадратична поляризація** та **кубічна поляризація**. Практично всі явища нелінійної оптики пов'язані з квадратичною та кубічною поляризацією.

Нелінійна оптика - розділ оптики, в якому досліджується сукупність оптичних явищ, що спостерігаються при взаємодії світлових полів з речовиною, яка має нелінійну реакцію вектора поляризації на вектор напруженості електричного поля світлової хвилі. У більшості речовин дана нелінійність спостерігається лише при дуже високих інтенсивностях світла, що зазвичай

досягається за допомогою лазерів. Прийнято вважати як взаємодія, так і сам процес лінійними, якщо його ймовірність пропорційна першого ступеня інтенсивності випромінювання. Якщо ця ступінь більше одиниці, то як взаємодія, так і процес називаються нелінійними. Таким чином виникли терміни лінійна і нелінійна оптика.

Поява нелінійної оптики пов'язано з розробкою лазерів, які можуть генерувати світло з великою напруженістю електричного поля на невелику площину середовища, сумірною з напруженістю мікроскопічного поля в атомах.

Основні причини, що викликають відмінності у впливі випромінювання великої інтенсивності від випромінювання малої інтенсивності на речовину:

1. При великій інтенсивності випромінювання головну роль відіграють многофотонні процеси, коли в елементарному акті поглинається кілька фотонів.
2. При великій інтенсивності випромінювання виникають ефекти самовпливу призводять до зміни вихідних властивостей речовини під впливом випромінювання [1].

Нелінійна оптика має велику кількість різних фізичних явищ:

Багатофотонні процеси:

- Генерація другої гармоніки, або подвоєння частоти світла, що є генерацією світла з подвоєною частотою і зменшеною вдвічі довжиною хвилі;
- Додавання частот світла - генерація світла з частотою, яка дорівнює сумі частот двох інших світлових хвиль. Подвоєння частоти є окремим випадком даного явища;
- Генерація третьої гармоніки - генерація світла з потроєною частотою. Зазвичай є комбінацією двох попередніх явищ: спочатку відбувається подвоєння частоти, а потім складання частот вихідної хвилі і хвилі з подвоєною частотою;

- Генерація різницевої частоти - генерація світла з частотою, що дорівнює різниці частот двох інших світлових хвиль;
- Параметричне посилення світла - посилення вхідного (сигнального) світлового пучка в присутності більш високочастотної хвилі накачування, з одночасним утворенням холостої хвилі;
- Параметрична осциляція - генерація сигнальної і холостої хвилі з використанням параметричного підсилювача в резонаторі (без вхідного пучка);
- Параметрична генерація світла - подібна параметричній осциляції, однак резонатор відсутній. Замість нього використовується сильне посилення світла;
- Спонтанне параметричне розсіювання - зменшення частоти світла при його проходженні через нелінійний оптичний кристал;
- Електрооптична поляризація (оптичне випрямлення) - процес генерації постійного електричного поля при проходженні світла через речовину;
- Чотирьоххвильова взаємодія;
- Самоіндукована прозорість - явище різкого зменшення втрат енергії при проходженні ультракоротких монохроматичних імпульсів випромінювання через резонансну середу;

Та інші:

- Оптичний ефект Керра, що є залежністю показника заломлення від інтенсивності світла;
- Самофокусування, Самодефокусування;
- Фазова саомодуляція;
- Синхронізація мод, заснована на ефекті Керра (KLM);
- Частотна саомодуляція світла надкоротких світлових імпульсів;
- Оптичні солітони;
- Міжфазова модуляція;

- Генерація ортогонально поляризованої хвилі - ефект виникнення хвилі з поляризацією, перпендикулярній до вектора поляризації вихідної хвилі;
- Посилення Рамана;
- Оптичне об'єднання фази;
- Розсіювання Манделъштама - Бріллюена, що є взаємодією оптичних фотонів з акустичними фононами;
- Двухфотонне поглинання - одночасне поглинання двох фотонів, що передають свою сумарну енергію одному електрону;
- Множинна фотоіонізація, квазіодночасний процес вибивання безлічі пов'язаних електронів одним фотоном;
- Хаос в оптичних системах

1.2. Лінійний електрооптичний ефект та ефект Керра

Під електрооптичним ефектом розуміється зміна оптичних характеристик речовини під дією низькочастотного або статичного поля. Існує два види: **лінійний електрооптичний ефект (ЛЕОЕ)** або **ефект Поккельса**, якщо зміна діелектричної проникності ϵ пропорційно напруженості поля та **квадратичний електрооптичний ефект** або **ефект Керра**, при якому ϵ пропорційна квадрату напруженості. Для спостереження ЛЕОЕ потрібний вплив низькочастотного і світлового поля.

В загальному випадку маємо:

$$P_i^{(2)} = d_{ijk} E_j(\omega) E_k(\omega_1), \quad (3)$$

де ω – частота в оптичному діапазоні, ω_1 – в радіохвильовому діапазоні.

Цей ефект спостерігається в нецентросиметричних кристалах.

Виходячи з ряду формул [2], маємо, що електричне поле в загальному випадку змінює симетрію кристалу (кристал з оптично ізотропного

перетворюється в одноосний або двохосний), а також змінює головні значення показника заломлення.

Математично ЛЕОЕ описується зміною оптичної інтєкадтриси кристала – еліпсоїду показників заломлення, який в головній кристалофізичній системі координат має вигляд:

$$a_{10}x^2 + a_{20}y^2 + a_{30}z^2 = 1 \quad (4)$$

де x, y, z – головні осі кристалу, тобто напрями вздовж яких вектори електричного поля і електрочної індукції паралельні один одному. $a(10,20,30)$ – показники заломлення для світла поляризованого вдоль осей. Вони визначаються розподілом зарядів всередині кристалу. При впливі електричного поля малого в порівнянні з внутрішнім полем кристалу, призводить до перерозподілу зарядів і невеликої деформації іонних решітки, що призводить до зміни показника заломлення і відповідно коефіцієнтів еліпсоїда.

Якщо до ізотропного середовища прикласти низькочастотне або статичне електричне поле, то під його дією середовище стає двохпроменевозаломлюючим. Цей ефект був відкритий Дж. Керром в 1875 році. Електрооптичний ефект можна зрозуміти, використовуючи кубічну поляризацію речовини:

$$P_i^{(3)} = d_{ijkl} E_j(\omega) E_k(0) E_l(0), \quad (5)$$

де ω – частота в оптичному діапазоні.

Взявши до уваги зв'язок між індукцією і напруженістю електричного поля на частоті ω маємо зміну тензора:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0 + 4\pi d_{ijkl} E_k(0) E_l(0). \quad (6)$$

В 1956 році Бекінгем зверну увагу на можливість спостереження ефекту Керра при дії поляризованого пучка світла в оптичному діапазоні на анізотропні і анізотропні молекули.

Наведений в такій молекулі дипольний момент має різні значення по головним осям.

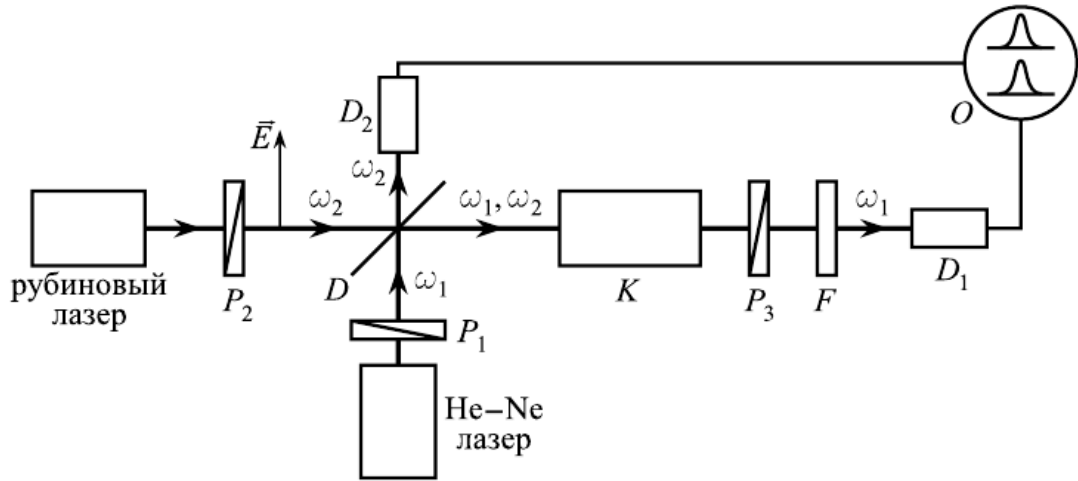


Рис.1. Схема спостереження оптичного ефекту Керра. P (1-3) – поляризатори; D – світлоділительна пластинка; K – кювета з рідиною; D (1-2) – детектори, які реєструють випромінювання пробної хвилі з ω_1 і хвилею накачки з ω_2 ; F – фільтр, який пропускає пробний пучок; O – екран осцилографа.

Феноменологічна теорія оптичного ефекту Керра заснована на запису в ізотропному середовищі кубічної поляризації у вигляді:

$$P_i^{(3)} = d_{ii jj} E_i(\omega_1) E_j(\omega_2) E_j^*(\omega_2) = d_{ii jj} E_i(\omega_1) |A_j|^2, \quad (6)$$

де E_i і ω_1 – поле і частота пробної хвилі, E_j і ω_2 – поле і частота хвилі накачки. Тоді ми маємо зміну показника заломлення пробної хвилі вздовж осі i :

$$n_i^2 = n_0^2 + 4\pi d_{ii jj} |A_j|^2. \quad (7)$$

Оптичний ефект Керра вперше спостерігали французькі вчені в 1964 році після створення лазерів. Схема установки представлена на рис. 1.

Поляризований пучок випромінювання від імпульсного рубінового лазера частково проходив через світлову ділительну пластину D і падав на кювету K, в свою чергу відбитий пучок посилався на приймач випромінювання D2, з'єднаний з двухпроменевим осцилографом. Пробний пучок створювався He-Ne лазером і також падав на кювету з рідиною (нітробензол). Кут між площинами поляризації після поляризаторів P1, P2 рівний $\pi/4$, поляризатори P3,

P4 зхрещені. Після проходження через фільтр пробний пучок падав на детектор D1, сигнал від якого подавався на другий вхід осцилографа. Про існування оптичного ефекту Керра можна було говорити по появі на екрані осцилографа короткочасного електричного імпульса від пробного пучка, синхронного з імпульсом від пучка накачки [1].

1.3 Самодифракція та динамічна голографія

Самодифракція – це один з перших ефектів взаємодії, які були знайдені в середовищах з кубічною поляризацією. Для знаходження цього ефекту на нелінійне середовище потрібно послати два лазерних пучка з хвильовими векторами, які складають деякий кут 2θ . Направлення лазерних пучків створюються за допомогою різних розчепитилів одного пучка (біпризма, білінза та інше.)

Нехай на розчепитель лазерного пучка падає достатньо широкий лазерний пучок (рис. 2). Ширину пучка задаємо за допомогою двох лінз з різними фокусними довжинами. При перетинанні пучків формується інтерференційна картина. Якщо на інтерференційний участок помістити прозорий зразок, то інтенсивність інтерференційного поля буде визначатись такою формулою:

$$I = I_{0_1} + I_{0_2} + 2\sqrt{I_{0_1} I_{0_2}} \cos 2k_x x, \quad (8)$$

де $k_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_0 \sin \theta$, n_0 – показник заломлення зразка. Інтерференційні максимуми знаходяться в площинах $x_m = \text{const}$, та інтервал між ними:

$$d = \frac{\lambda}{2n_0 \sin \theta} = x_{\min} - x_m. \quad (9)$$

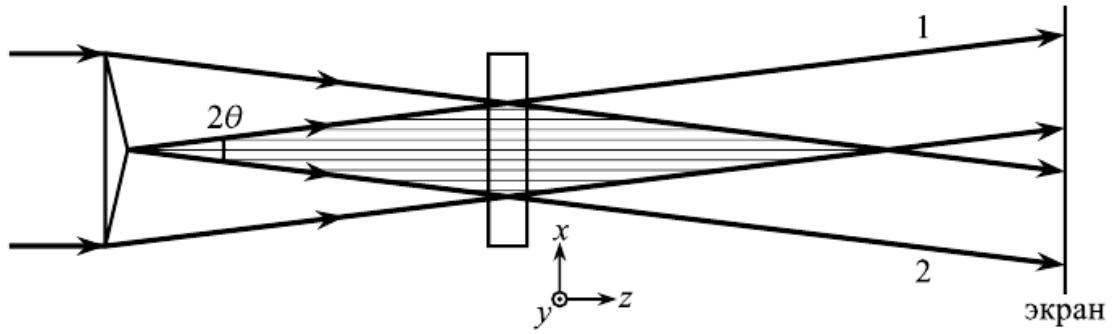


Рис.2.

На екрані, який поміщений за областю інтерференції, буде спостерігатись дві плями від двох пучків, які не перетинаються. Нехай зразок має Керровську нелінійність ($n = n_0 + n_2 I$). В цьому випадку в зразку виникає модуляція показника заломлення з періодом, який повторює період інтерференції:

$$n = n_0 + n_2(I_{0_1} + I_{0_2}) + 2n_2 \sqrt{I_{0_1} I_{0_2}} \cos 2k_x x. \quad (10)$$

Достатньо тонкий зразок, товщиною $\ell < d^2/\lambda$, буде вести себе як плоска фазова дифракційна решітка, і при дифракції Фраунгофера на екрані з'являються дифракційні максимуми, кутове положення яких θ_m визначається умовою:

$$n_0 d(\sin \theta_m \mp \sin \theta) = m\lambda. \quad (11)$$

Підставляючи (9) в (11), маємо:

$$\sin \theta_m = (2m \mp 1) \sin \theta. \quad (12)$$

Тут $m = 0, +(-)1, +(-)2\ldots$ - порядки головних максимумів, знак «+» відповідає дифракції першого пучка, падаючого на фазову пластину, «-» належить другому пучку.

На екрані в результаті самодифракції з'являться плями від головних максимумів, відповідаючих порядкам m для першого і другого пучків (рис. 3)

	1	2
•	+2	+3
•	+1	+2
●	0	+1
●	-1	0
•	-2	-1
•	-3	-2

Рис.3.

Поява головних максимумів призводить до подальшого розмноження вторинних решіток.

Явище самодифракції найбільш просто спостерігати в тонких слабкопоглинаючих плівках середовищ, які використовуються для запису голографічних решіток. До таких матеріалів відносяться тонкі плівки аморфних халькогенідів деяких металів (As_2S_3 , As_2Se_3 , та інші), тонкі плівки галогенідів срібла (AgCl , AgBr , AgI), деяких фотополімерів та інше. Для підвищення чутливості деяких плівок (As_2S_3 , AgCl та інші) в них вводиться надлишкове срібло. При дії двох пучків, падаючих на ці плівки під малими кутами θ , в них записуються голографічні решітки. Якщо опромінення плівок проводиться в області слабого поглинання ($n \gg \chi$, де χ – показник поглинання), і товщина плівки $d \ll \delta$, де δ – глибина проникання світла в фотошар, то в плівці записується тонка фазова або фазово-амплітудна решітка з періодом, заданим формулою (9). Суттєвою при запису є можливість використання малопотужних газових лазерів безперервної дії (He-Ne, He-Cd, та інші), а також повільний розвиток решіток при запису. Це дозволяє детально прослідкувати явище самодифракції. Такі експерименти корисні в наукових цілях і можуть бути проведені в студентських лабораторіях, які мають лазери і вакуумні установки для виготовлення зразків.

Виявлення явища самодифракції визвало появу нової області нелінійної оптики – динамічної голографії.

Як відомо, в звичайних голографії запис і зчитування інформації проводиться роздільно по часу. При запису інтерференційної картини від опорного і предметного пучків на фотопластинах створюється приховане зображення. Для проявлення видимого об'ємного зображення предмету фотошар піддається відповідній хімічній обробці, і зображення відновлюється за допомогою опорного пучка.

Інакше записуються та зчитуються голограмми при самодифракції. В нелінійних середовищах голограмма реєструється в реальному часі, тобто в процесі опромінення середовища двома або декількома пучками. Ті ж пучки в процесі запису зчитуються голограмму. Якщо діючі пучки в процесі запису змінюють свої характеристики (інтенсивність, напрям, та інше), динамічна голографія здатна прослідкувати за цими змінами.

Характер записуючих решіток залежить від вибору реєструючого нелінійного середовища. Якщо середовище має достатнє поглинання, то записуються амплітудно-фазові решітки. В прозорих (керровських) середовищах записуються фазові решітки. Поглинання суттєво впливає на їх дифракційну ефективність. Найбільшу дифракційну ефективність мають фазові решітки.

Процес запису і зчитування залежить від співвідношення часів: τ_i та τ_r , де τ_i - характерний час зміни характеристик падаючих пучків, τ_r – час релаксації реєструючого середовища. При $\tau_i \gg \tau_r$ запис і зчитування відбуваються одночасно, тобто має місце квазістаціонарний режим динамічної голографії. Коли ж, $\tau_r \gg \tau_i$ запис решіток не слідує по часу за інтерференційною картиною. При великих τ_r голограми записуються при дії стаціонарних або повільно змінювальних лазерних пучків, тому цей випадок менш цікавий в рамках динамічної голографії.

Нестационарний режим досягається при $\tau_r \approx \tau_i$. Величина τ_r залежить від реєструючих середовищ. Найменшими значеннями $\tau_r \approx 10^{-12}$ с, як згадувалось, мають Керровські середовища. Великими значеннями τ_r мають речовини, в яких нелінійні перетворення пов'язані з рухом атомів або іонів. До них відносяться речовини, які використовуються для запису і збереження інформації.

Запис і зчитування динамічних голограм залежать від товщини h використовуваних зразків і їх періоду d . В двухпучковій схемі розрізняють тонкі голограми ($h \ll d^2/\lambda$) і товсті ($h \gg d^2/\lambda$). В товстих голограмах реалізується дифракція Брегга на відміну від раніше згаданих тонких решіток, де має місце дифракція Рамана-Ната.

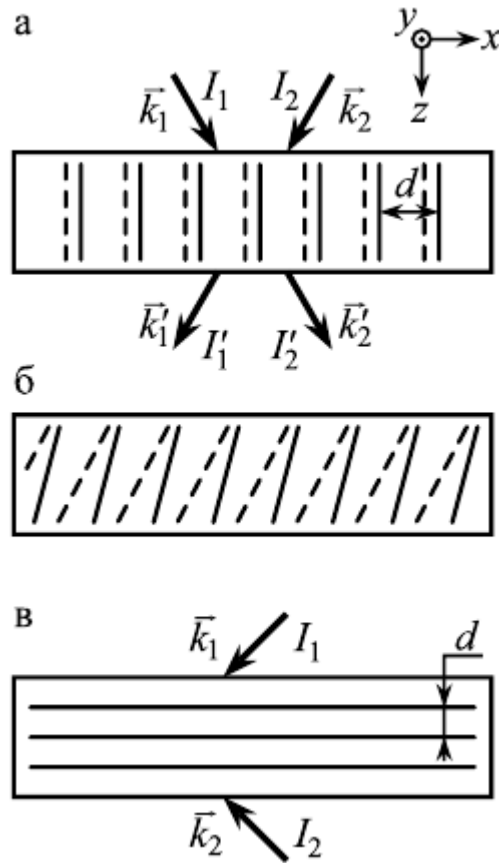


Рис. 4. Формування динамічних голограм в нелінійному середовищі: а) при $I_1 = I_2$ та $I_1 > I_2$ на початку опромінення; б) при нестаціонарному режимі при $I_1 > I_2$; в) відбивальна голограма. Пунктир – інтерференційні полоси, суцільні лінії – штрихи решіток.

Розглянемо формування решіток у випадку дифракції Брегга. При падінні на середовище двох близько направлених пучків формується пропускна голограма з вектором $\vec{K} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 = 2k_x \vec{i}$, і $\vec{K} = \frac{2\pi}{d} \vec{i}$ (див. рис.4а). А коли ж, при падінні зустрічних пучків під невеликим кутом (рис.4в) формується відбивальна голограма з $\vec{K} = 2k_z \vec{k}$. Розглянемо **пропускні голограми**.

Припустимо, що на середовище падає два пучка різними інтенсивностями ($I_1 > I_2$), але однаковими кутами $\theta_2 = -\theta_1$ до осі z . В початковий момент часу в середовищі формується дифракційна решітка з $\vec{K} = 2k_x \vec{i}$ з штрихами, паралельними z . Нехай на таку решітку падає пучок «1». При дифракції на решітці з вектором \vec{K} виникає дифракція Брегга, і хвильовий вектор дифрагованої хвилі $\vec{k}'_1 = \vec{k}_1 - \vec{K} = \vec{k}_2$. Звідси ми приходимо до висновку, що слабкий пучок «2» підсилюється, а пучок «1» стає слабшим.

Розрахунок за допомогою рівнянь пов'язаних хвиль передбачує перекачку енергії між першим і другим пучком по мірі руху пучків в зразку. Пучок «2» при визначній координаті z може перевищити по інтенсивності пучок «1». В Керровських середовищах із-за нелінійності при цьому $|\vec{k}_2| > |\vec{k}_1|$. Наслідком цього є динамічний нахил інтерференційної картини і нахил вектору решітки відносно осі x (рис. 4б), при чому хвильові вектори інтерференційного поля і решітки в нестационарному режимі ($\tau_r \approx \tau_1$) не співпадають по напрямку. Цікавим результатом для фазових решіток є також зсув по фазі інтерференційної картини і штрихів решіток. Якщо цей зсув $\Delta\varphi = 0, \pi$, то кажуть про нелокальний нелінійного середовища на дію пучків. При $\Delta\varphi \neq 0, \pi$ має місце нелокальний . Найбільша перекачка енергії між пучками досягається при $\Delta\varphi = \pi/2$. Фазовий зсув $\Delta\varphi$ залежить від механізму нелінійності середовища і найбільшим чином проявляється в фоторефрактивних кристалах і напівпровідниках.

Серед **відбивальних голограм** найбільший інтерес представляють решітки, які записуються в нелінійних середовищах зустрічними колінеарними пучками. Розглянемо достатньо товсте нелінійне середовище, товщиною $L \gg d^2/\lambda$, де d – період інтерференційної картини. При відбиванні від задньої межі зразка ($z=L$) виникає інтерференційне поле (рис. 5), розподіл інтенсивності в якому таке:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2k_z z + \varphi_0), \quad (13)$$

де I_1 – інтенсивність падаючого пучка, $I_2 = RI_1$ – інтенсивність зустрічного пучка, R – коефіцієнт відбивання задньої межі ($R < 1$), φ_0 – зсув по фазі.

Початковий період інтерференції рівний $d = \frac{\lambda}{2n_0}$. Так як середовище нелінійне, виникає фазові решітка з модуляцією n з таким самим періодом:

$$n = n_0 + n_2(I_1 + I_2) + 2n_2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2k_z z + \Delta\varphi + \varphi_0), \quad (14)$$

де $\Delta\varphi$ - фазовий зсув максимумів інтерференції відносно мінімумів $n(z)$.

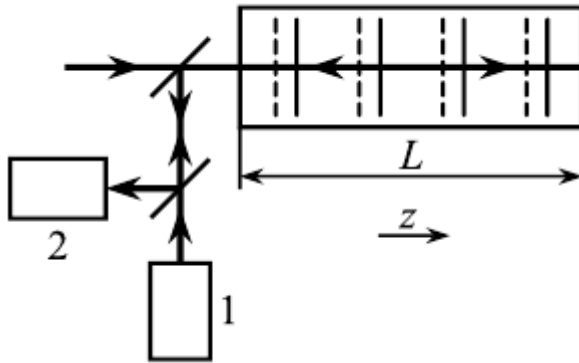


Рис. 5.

На решітці, яка утворюється, виникає дифракція Брегга, яка має умову $2d[n_0 + n_2(I_1 + I_2)] = \lambda_0$ і в загальному випадку приводить до посилення відбитого пучка і ослабленню падаючого пучка – ефект самовідбивання. В кінці кінців розподіл інтенсивності двох пучків стає функція z . Схематично цей розподіл показаний на рис. 6.

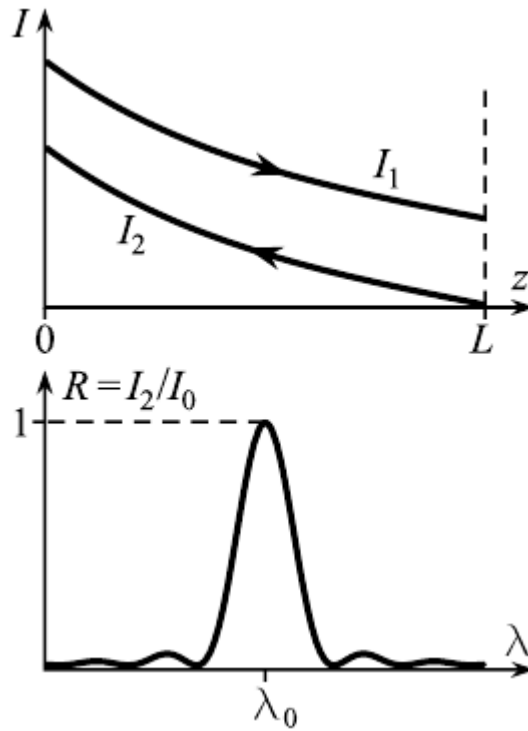


Рис. 6.

Ефект самовідбивання перевіряється експериментально за допомогою пробного пучка, який сканується по довжині хвилі λ (рис. 5).

Знайдено, що відбитий пучок має вузький максимум при λ_0 і інтенсивність відбитого пучка падає з ростом $|\lambda - \lambda_0|$ (рис. 6). В ранніх роботах вважалось, що самовідбивання найбільш ефективно при нелокальному отклике ($\Delta\varphi = \pi/2$). Незважаючи на це, більш пізні розрахунки передбачають виникнення перекачки інтенсивності і при локальному отклике ($\Delta\varphi = 0, \pi$), при цьому враховується нелінійна складова в формулі Брегга.

Самовідбивання має практичне значення. По-перше, при розгляді сильних пучків по круглому хвильоводу воно знижує його пропускання. По-друге, його використання дозволяє створювати вузькополосні відбивні фільтри [1].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ЗОБРАЖЕННЯ В НЕЛІНІЙНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.

2.1. Автостереоскопія

Автостереоскопія - це будь-який спосіб відображення стереоскопічних зображень (додавання бінокулярного сприйняття 3D-глибини) без використання спеціальних головних уборів або окулярів з боку глядача. Оскільки окуляри не потрібні, його також називають "3D без окулярів". Існують два широкі підходи, що використовуються для розміщення паралаксу руху і ширших кутів огляду: відстеження очей і багаторазові види, так що дисплеям не потрібно знати, де розташовані очі глядачів.

Приклади технології автостереоскопічних дисплеїв включають в себе лентикулярну лінзу, паралаксний бар'єр, об'ємний дисплей, голографічні і світлові поля.

Технологія. Багато організацій розробили автостереоскопічні 3D-дисплеї, починаючи від експериментальних дисплеїв у відділах університету до комерційних продуктів і використовуючи цілий ряд різних технологій. Метод створення автостереоскопічних дисплеїв з плоскими панелями з використанням лінз був розроблений в 1985 р. Рейнхардом Бернером з Інституту Генріха Герца (ННІ) в Берліні. Прототипи індивідуальних дисплеїв вже були представлені в 1990-х роках Sega AM3 (плаваючою системою зображень) і ННІ. Сьогодні ця технологія розвивається в основному європейськими та японськими компаніями. Одним з найвідоміших 3D дисплеїв, розроблених ННІ, був Free2C, дисплей з дуже високою роздільною здатністю і дуже хорошим комфортом, досягнутим завдяки системі спостереження за очима і безшовним механічним регулюванням лінз. Відстеження очей було використано в різних системах для того, щоб обмежити кількість відображених вікон лише двома, або збільшити стереоскопічне потрібне місце. Однак, оскільки це обмежує відображення для одного глядача, воно не є сприятливим для споживчих товарів.

В даний час більшість плоских панелей використовує лінзоподібні об'єктиви або паралаксні бар'єри, які перенаправляють зображення до декількох областей перегляду; однак, ця маніпуляція вимагає зменшених дозволів зображення. Коли голова глядача знаходиться в певному положенні, кожне око бачить інше зображення, що дає переконливу ілюзію 3D. Такі дисплеї можуть мати кілька зон зору, тим самим дозволяючи багатьом користувачам переглядати зображення одночасно, хоча вони можуть також демонструвати мертві зони, де тільки не стереоскопічне або псевдоскопічне зображення може бути видно, якщо взагалі [3].

2.2. Автостереограма

Автостереограма - вид стереограми, яка дає стереоскопічний (об'ємний) ефект без будь-яких зовнішніх сепаруючих пристосувань, таких як окуляри затворів, окуляри з поляризаційними фільтрами, анаглиф.

Найпростіша автостереограма

Для демонстрації можливості отримання тривимірного зображення на тонкому об'єкті можна провести наступний досвід (рис. 7):

Взяти стереопару, розрізати кожен кадр на вертикальні смуги. Скласти їх, щоб вони чергувалися наступним чином: перша смуга лівого зображення, перша смуга правого зображення, друга смуга лівого зображення, друга смуга правого зображення і т. Д. Потім витягнути по горизонталі, роздрукувати і скласти гармошкою. При перегляді з певної точки кожне око побачить своє зображення.

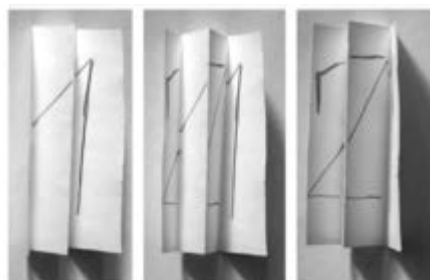


Рис. 7

Щілинний растр. Першим досвідом створення тривимірних зображень без застосування будь-яких спеціальних пристосувань були картини французького художника Gaspar Antoine de Bois-Clair, написані ним в 1692 році. Коли глядач рухався уздовж його робіт - вони, здавалося, змінюються від однієї до іншої. Це досягалось тим, що самі картини були розділені на вертикальні смуги, скомбіновані між собою, а глядачеві пропонувалося їх розглядати через ряд непрозорих дерев'яних брусків, розташованих з відстанями між ними, вертикально, щодо площині картин (рис. 8).

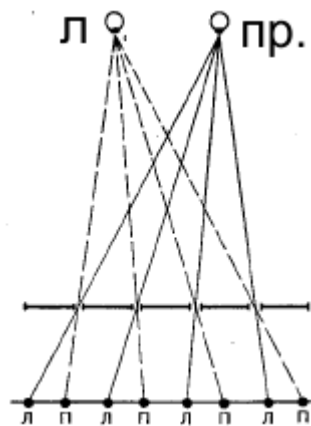


Рис. 8

Застосування циліндричних лінз. Практичне застосування щілинного растра недоцільно, так як чорні непрозорі смужки, що накладаються на зображення, в значній мірі погіршують його якість і затемнюють його. У 1912 році Вальтер Хесс запатентував растр з циліндричними лінзами. Особливість циліндричних лінз полягає в тому, що в одному напрямку вони працюють як плоскопаралельні пластини, а в іншому, перпендикулярному до першого, як сферичні лінзи. Растр складається з великої кількості плоско-опуклих циліндричних лінз, зібраних впритул один до одного в єдиному блоці. Своєю плоскою стороною лінзовий растр звернений до зображення. Радіус кривизни лінз повинен бути такий, щоб промені світла, що падають перпендикулярно

листу, після заломлення на лінзах, збиралися на плоскій поверхні растра. Такі растри називаються лентикулярними.

Недоліки автостереограмм

I. Ступінчастість зображень

При накладенні растру на площині зображення виникає ступінчастість контурів і втрата дрібних деталей. Чим грубіше растр, тим помітніше даний недолік.

II. Обмежена глибина різкості

Незалежно від технології отримання зображення, растр не є ідеальною оптичною системою і матеріал, на якому розташовано кодоване зображення, не володіє ідеальною чіткістю - розтікання фарби або зернові плівки обмежують чіткість зображення. Покажемо це на прикладі.

Анімація демонструє результат багаторакурсної фотозйомки. Припустимо, що ми виготовляємо з цієї зйомки зображення розміром А4 з використанням принтера з дозволом 720 dpi на двох видах пластику. З грубої лінзою, 20 Lpi (крок 1,2 мм) і тонкою лінзою 70 Lpi (крок 0,35 мм).

Фрагменти закодованих зображень за допомогою деякого алгоритму виглядають так:

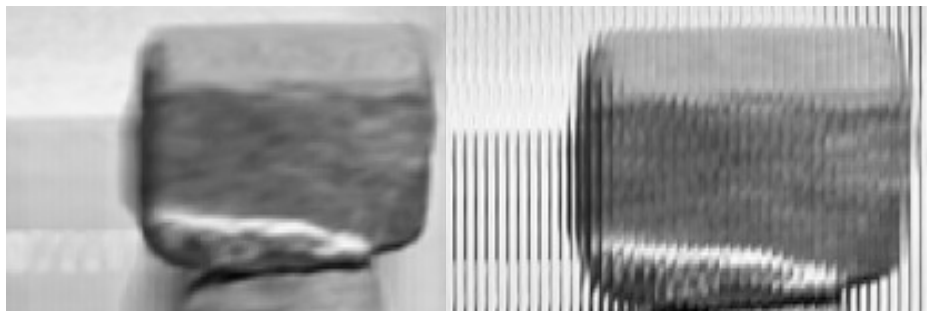


Рис. 9

Результат друку після накладення растра виглядає наступним чином:



Рис. 10. Вид відбитку на тонкому растрі 70 Lpi при друку 720 dpi.

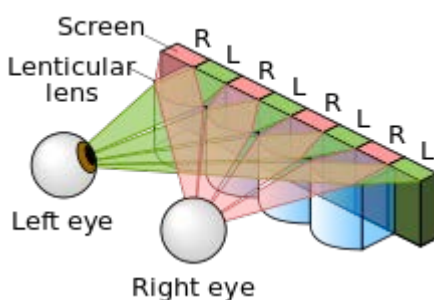
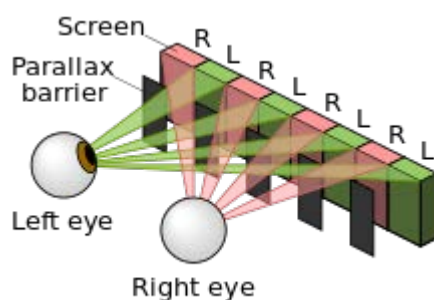


Рис. 11. Вид відбитку на грубому растрі 20 Lpi при роздільній здатності друку 720 dpi.

На тонкому растрі 70 Lpi добре збереглися деталі переднього об'єкта, але сильно впала чіткість далекого плану. На грубому растрі 20 Lpi помітна загальна грубість зображення, але дальній план чіткіший ніж в тонкому растрі, і це пов'язано з чіткішим зображенням об'єктів в площині листа, але зустрічається чіткість з глибиною. Швидкість падіння чіткості з глибиною залежить від досягнутої чіткості друку, якості поверхні растру і точності відповідності товщини растру фокусної відстані лінзи [4].

Паралаксний бар'єр. Паралаксний бар'єр є пристроєм, розміщеним перед джерелом зображення, таким як рідкокристалічний дисплей, щоб він міг показати стереоскопічне зображення або мультископічне зображення без необхідності, щоб глядач носив 3D-окуляри. Принцип паралаксного бар'єру був самостійно винайдений Огюстом Берт'є, який опублікував перший, але не дав практичних результатів і Фредеріку Е. Івесу, який зробив і виставив перший відомий функціональний автостереоскопічний образ у 1901 році. Близько двох років по тому Айвз почав продавати зразки зображень як новинки, перше відоме комерційне використання.

На початку 2000-х років, Sharp розробив електронне плоскочаспелньне застосування цієї старої технології для комерціалізації, коротко продавши два ноутбуки з єдиними в світі 3D-екранами. Ці дисплеї більше не доступні від компанії Sharp, але все ще виробляються та розвиваються іншими компаніями. Аналогічно, Hitachi випустила перший 3D мобільний телефон для японського ринку, який розповсюджується KDDI. У 2009 році компанія Fujifilm випустила цифрову камеру FinePix Real 3D W1, яка має вбудований автостереоскопічний РК-дисплей діаметром 2,8 дюйма (71 мм). Рідна країна консолей відеоігор Nintendo 3DS використовує паралаксний бар'єр для 3D-зображень; на новій версії, New Nintendo 3DS, це поєднується з системою відстеження очей.



2.3. Інтегральна фотографія та лінзовидні масиви

Принцип інтегральної фотографії, який використовує двовимірний масив (X-Y) з багатьох малих об'єктів для захоплення 3-D сцени, був введений Габріелем Ліппманом в 1908 році. Інтегральна фотографія здатна створювати подібні до вікон автостереоскопічні дисплеї, які відтворюють об'єкти та сцени в натуральну величину, з повним паралаксом і зміною перспективи і навіть глибиною розміщення, але повна реалізація цього потенціалу вимагає дуже великої кількості дуже малих - якісно оптичних систем і дуже високої пропускної здатності. Тільки відносно грубі фотографічні та відеоздійснення ще не були створені. [5]

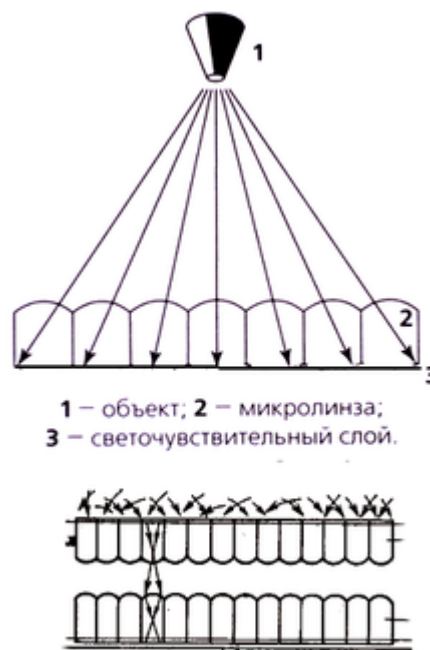


Рис. 13

Одномірні масиви циліндричних лінз були запатентовані Вальтером Гессом у 1912 році. Замінивши просторові пари і лінії в простому паралаксовому бар'єрі з крихтними циліндричними лінзами, Гесс уникнув втрати світла, які затьмарювали зображення, що переглядаються світлом, що пропускається, і які

робили відбитки на папері неприйнятно темними. Додаткова перевага полягає в тому, що позиція спостерігача менш обмежена, оскільки заміщення лінз є геометрично еквівалентним звуженню простору у бар'єрі [6].

Philips вирішив значну проблему з електронними дисплеями в середині 1990-х років, нахилиючи циліндричні лінзи щодо базової піксельної сітки. Грунтуючись на цій ідеї, Philips випустила свою лінію WOWvx до 2009 року, працюючи до 2160p (дозвіл 3840×2160 пікселів) з 46 кутами огляду. Компанія Ленні Ліптона, StereoGraphics, виробляла дисплеї, засновані на тій же ідеї, посилаючись на набагато більш ранній патент на похилі лінзоподібні.

Компресійні світлові дисплеї. З швидкими досягненнями в області оптичного виготовлення, цифрової обчислювальної потужності та обчислювальних моделей для сприйняття людини, з'являється нове покоління технології відображення: відображається поле стисненого світла. Ці архітектури досліджують спільне проектування оптичних елементів і обчислень при стисненні, беручи до уваги особливі характеристики візуальної системи людини. Конструкції компресорних дисплеїв включають подвійні і багат шарові пристрої, які керуються такими алгоритмами, як комп'ютерна томографія і невід'ємна матрична факторизація і невід'ємна тензорна факторизація.

Інструменти для миттєвого перетворення існуючих 3D-фільмів в автостереоскопічні демонстрували Dolby, Stereolabs і Viva3D.

У 2002 році компанія Dimension Technologies випустила ряд комерційно доступних 2D/3D комутаційних LCD-дисплеїв, використовуючи комбінацію паралакських бар'єрів і лентикулярних лінз. SeeReal Technologies розробила голографічний дисплей на основі відстеження очей. CubicVue демонстрував автостереоскопічний дисплей з кольоровим фільтром на конкурсі i-Stage асоціації споживчої електроніки в 2009 році.

Також існує безліч інших систем автостерео, таких як об'ємний дисплей, в якому реконструйоване світлове поле займає справжній об'єм простору, та в якому є інтегральне зображення, яке використовує матрицю лінзових «очей».

Нещодавно термін автоцифровий дисплей був введений як коротший синонім довгого "багаторазове автостереоскопічне 3D-відображення", а також для більш ранніх, більш специфічних "панорамаграм паралакса". Останній термін спочатку вказував на безперервну вибірку вздовж горизонтальної лінії точок зору, наприклад, захоплення зображення за допомогою дуже великої лінзи або рухомої камери і екрана перенесення бар'єру, але пізніше він включав синтез з відносно великої кількості дискретних спостережень.

Студія Sunny Ocean, яка розташована в Сінгапурі, отримала дозвіл на розробку автоматизованого екрана, який може відображати 3D-зображення автостерео з 64 різних контрольних точок.

Принципово новий підхід до автостереоскопії, званий HR3D, був розроблений дослідниками з Media Lab MIT. В ньому споживання буде потребувати вдвічі менше енергії, подвоївши час автономної роботи, якщо використовувати з пристроями, такими як Nintendo 3DS, без погіршення яскравості або дозволу екрану. Також в наявності інші переваги, такі як більший кут огляду, він підтримував би 3D-ефект навіть при поверненні екрана.

Паралакс руху: системи одновимірного перегляду проти багатовимірних систем

Рух паралакса відноситься до того, що вигляд сцени змінюється з рухом голови. Таким чином, різні зображення сцени розглядаються, коли голова переміщується зліва направо, або згори вниз.

Багато автостереоскопічних дисплеїв є одновидовими дисплеями і, таким чином, не здатні відтворювати відчуття руху паралакса, за винятком систем з одним глядачем, здатних відстежувати очі.

Деякі автостереоскопічні дисплеї, однак, є багатовимірними дисплеями і, таким чином, здатні забезпечити сприйняття паралакса руху вліво-вправо.

Для таких дисплеїв характерні вісім і шістнадцять поглядів. Хоча теоретично можливе моделювання сприйняття паралакса руху вгору-вниз, не відомі нинішні системи відображення, і ефект «вгору-вниз» широко розглядається як менш важливий, ніж паралакс руху вліво-вправо. Одним із

наслідків невключення паралакса по обидві осі стає більш очевидним, коли представлені об'єкти, все більш віддалені від площини дисплея: коли глядач наближається або віддаляється від дисплея, такі об'єкти будуть більш очевидно демонструвати ефекти зміщення перспективи щодо одної вісі, але не іншої, та з'являються різним чином розтягнуті або роздавлені до глядача, не розташованого на оптимальній відстані до дисплея [7].

2.4. Мультископія

На відміну від звичайної 3D-стереоскопії, яка імітує 3D-сцену, відображаючи лише два різних види, кожен з яких видно лише для окремого ока глядача, 3D-мультиспрямування відображає більше двох зображень, що представляють об'єкт, що переглядається з серії місць, і дозволяє кожне зображення робити видимим тільки з діапазону вузлів, які вужчі, ніж середня людська відстань між собою в 63 мм. Як результат, не тільки кожне око бачить інше зображення, але різні пари зображень видно з різних місць перегляду.

Це дозволяє спостерігачеві переглядати 3D-об'єкт під різними кутами, коли вони переміщують свою голову, імітуючи реальну глибину сигналу перемикання паралакса. Це також зменшує або усуває ускладнення псевдоскопічних зон перегляду, типових для 3D-дисплеїв "без окулярів", які використовують тільки два зображення, що дозволяє декільком випадково розташованим спостерігачам одночасно бачити об'єкт у правильному 3D.

Фотографічні зображення цього типу отримали назву паралаксальних панорамних зображень винахідником Гербертом Е. Айвсом приблизно в 1930 році, але цей термін міцно пов'язаний з безперервним відбором горизонтальних точок зору, захоплених камерою з дуже широкою лінзою або лінзою, яка рухається горизонтально під час експозиції. Останнім часом придуманий термін все частіше приймається як більш точний описовий, тому що посиляється на електронні системи, які фіксують і відображають лише кінцеве число дискретних поглядів.

Об'ємний пристрій відображення є графічним пристроєм відображення, що формує візуальне зображення об'єкта в трьох фізичних розмірах, на відміну від планарного зображення традиційних екранів, що імітують глибину через ряд різних візуальних ефектів. Одне з визначень, запропонованих піонерами в даній області, полягає в тому, що об'ємні дисплеї створюють 3D-зображення за допомогою випромінювання, розсіювання або ретрансляції освітлення з чітко визначених областей у просторі (x, y, z). Хоча серед дослідників немає консенсусу, може бути доцільним допустити голографічні дисплеї та дисплеї з великою кількістю зображень до об'ємного сімейства дисплеїв, якщо вони роблять роботу по проектуванню тривимірного світлового поля в межах об'єму.

Більшість, якщо не всі, об'ємні 3D-дисплеї або автостереоскопічні, або автоматизовані; тобто, вони створюють тривимірні зображення, видимі неозброєним оком. (Зауважимо, що деякі фахівці на дисплеї зберігають термін "автостереоскопічний" для просторово-мультиплексованих дисплеїв з паралаксами з плоскими панелями, наприклад, дисплеї з лінзовими листами. Тому дуже широка група відображуваних архітектур правильно вважається автостереоскопічною.)

Об'ємні 3D-дисплеї втілюють лише одну сім'ю 3D-дисплеїв в цілому. Іншими видами 3D-дисплеїв є: стереограми / стереоскопи, послідовні дисплеї, електро-голографічні дисплеї, паралаксні «два виду» і паралаксні панораммаграми (які є типово просторово-мультиплексованими системами, такими як дисплеї з лінзовими аркушами і дисплеями параллакс-бар'єрів), системи візуалізації та інші.

Незважаючи на те, що вперше в 1912 році було постульовано, і як основна частина наукової фантастики, об'ємні дисплеї все ще знаходяться на стадії розробки, і вони ще мають досягти загального населення. З різноманітними системами, які пропонуються і використовуються в невеликих кількостях - в основному в наукових і науково-дослідних лабораторіях - об'ємні дисплеї залишаються доступними лише для вчених, корпорацій і військових.

Багато різних спроб було зроблено для виробництва об'ємних пристроїв формування зображень. Не існує офіційно прийнятої «таксономії» різноманіття об'ємних проявів, що ускладнюється багатьма перестановками їх характеристик. Наприклад, освітлення в об'ємному дисплеї може або дійти до ока безпосередньо з джерела або через проміжну поверхню, наприклад, дзеркало або скло; аналогічно, ця поверхня, яка не повинна бути відчутною, може зазнавати рухів, таких як коливання або обертання. Одна категорія така:

Швидкий дисплей. Об'ємні тривимірні 3D-дисплеї з швидкозмінюваною поверхнею (або "об'ємною") розраховують на людське наївне бачення, щоб злити ряд фрагментів 3D-об'єкта в єдине 3D-зображення. Були створені різноманітні швидкозмінювані дисплеї. Наприклад, 3D-сцена обчислювально розкладається на серію "зрізів", які можуть бути прямокутними, дископодібними або спірально поперечними перерізами, після чого вони проєктуються на або з поверхні дисплея, що перебуває у русі. Зображення на 2D поверхні (створене проєкцією на поверхню, світлодіоди, вбудовані в поверхню, або інші методи) змінюються по мірі переміщення або обертання поверхні. Зберігаючи погляд, людина сприймає безперервний об'єм світла. Поверхня дисплея може бути відбивною, пропускаючою або комбінацією обох [8].

Іншим типом 3D-дисплея, який є кандидатом у класі 3D-дисплеїв з розгорнутим об'ємом, є архітектура «varifocal mirror». Одна з перших посилань на цей тип системи - з 1966 року, коли вібруюча дзеркальна барабанна вібрація відображає ряд шаблонів від високошвидкісного 2D-зображувального джерела, такого як векторний дисплей, до відповідного набору глибинних поверхонь.

Комерційне застосування, відоме як Hypervsn, використовує спінінгові смуги LED, встановлених у формі гвинта; датчики визначають положення і кут кожного LED, і вони підсвічуються під контролем мікропроцесора для створення зображення [9].



Рис. 14 [9]

Статично-об'ємні 3D-дисплеї. Так звані "статично-об'ємні" 3D-дисплеї створюють зображення без будь-яких макроскопічних рухомих частин в обсязі зображення. Незрозуміло, чи повинна решта системи залишатися стаціонарною, щоб в цьому класі відображення було життєздатним.

Це, мабуть, найбільш "пряма" форма об'ємного відображення. У найпростішому випадку адресний об'єм простору створюється з активних елементів, які є прозорими у вимкненому стані, але є непрозорими або світловими у включеному стані. Коли елементи (так звані воксели) активовані, вони показують суцільний малюнок в просторі дисплея.

Кілька об'ємних 3D-дисплеїв із статичним обсягом використовують лазерне світло для заохочення видимого випромінювання в твердому, рідкому або газовому випромінюванні. Наприклад, деякі дослідники поклалися на двоступеневе перетворення в матеріалі, легovanому рідкісноземельними матеріалами, коли вони освітлювалися пересічними інфрачервоними лазерними променями відповідних частот.

Останні досягнення зосереджувалися на нематеріальних (вільно-просторових) реалізаціях категорії статичного об'єму, що могло б в решті-решт дозволити безпосередню взаємодію з дисплеєм. Наприклад, дисплей туману з

використанням декількох проекторів може відображати 3D-зображення в обсязі простору, що призводить до об'ємного відображення статичного об'єму.

Техніка, представлена в 2006 році, повністю позбавляє дисплея носія, використовуючи фокусований імпульсний інфрачервоний лазер (близько 100 імпульсів в секунду; кожен триває наносекунду), щоб створити кульки плазми, які світяться в повітрі. Фокусна точка спрямовується двома рухомими дзеркалами і ковзною лінзою, що дозволяє малювати фігури в повітрі. Кожен імпульс створює звук вискоку, так що пристрій тріщить, коли працює. В даний час він може генерувати точки в межах кубічного метра. Вважається, що пристрій можна масштабувати до будь-якого розміру, дозволяючи створювати 3D-зображення в небі.

Пізніші модифікації, такі як використання неонові / аргоні / ксеноні / гелієві газові суміші, подібні до плазмової кулі та швидкої системи рециркуляції газу, що використовує капот і вакуумні насоси, дозволяють цій технології досягти двоколірного (R / W) і, можливо, зображення RGB шляхом зміни ширини імпульсу і інтенсивності кожного імпульсу для налаштування спектрів випромінювання тіла світла плазми.

У 2017 році був опублікований новий дисплей, відомий як "3D Light PAD". Середовище дисплея складається з класу фотоактивних молекул (відомих як спіродаміни) і технології цифрової обробки світла (DLP) для створення структурованого світла в трьох вимірах. Техніка обходить необхідність використання потужних лазерів і генерації плазми, що полегшує занепокоєння щодо безпеки і значно покращує доступність тривимірних дисплеїв. УФ-світлові і зелено-світлі візерунки спрямовані на розчин барвника, який ініціює фотоактивацію і таким чином створює воксель. Пристрій здатний відображати мінімальний розмір вокселів 0,68 мм³, з роздільною здатністю 200 мкм і хорошу стабільність протягом сотень циклів увімкнення-вимкнення.

Інтерфейси людини і комп'ютера. Унікальні властивості об'ємних дисплеїв, які можуть включати перегляд на 360 градусів, узгодження збіжних і житлових сигналів, а також властиві їм "тривимірність", дозволяють

використовувати нові технології інтерфейсу користувача. Існують нещодавні роботи, які досліджують переваги швидкості і точності об'ємних дисплеїв, нові графічні інтерфейси користувача, і медичні додатки, розширені за допомогою об'ємних дисплеїв.

Крім того, існують програмні платформи, які забезпечують об'ємні дисплеї рідного і застарілого 2D і 3D-контенту.

Художнє використання. З 1994 року досліджується артформ, який називається Hologlyphics, що поєднує елементи голографії, музики, відеосинтезу, прозорого фільму, скульптури та імпровізації. Об'ємні фільми демонструвалися живим глядачам на кінофестивалі, художній галереї та музичній події. Кілька об'ємних дисплеїв і багатоканальних колонок оточують аудиторію. Фільми показуються разом з музикою, живі або записані за допомогою об'ємних анімацій.

Оригінальною метою було поєднати голографію з музикою, і, нарешті, об'ємні дисплеї були встановлені як художнє середовище. Багато традиційних фільмів і відео спеціальних ефектів були адаптовані до голографічних фільмів, а також було розроблено багато інших спеціальних ефектів, унікальних для об'ємних дисплеїв. До них відносяться об'ємні ефекти стирання, растровий згин, морфінг, калейдоскоп і ефекти віддзеркалення, експериментальні повороти, просторові ефекти деформування і секвенування зображень.

Hologlyphics фільми також можуть бути виконані в реальному часі, як відео синтезатор, керований музичними клавіатурами, датчиками руху, панелями управління та акустичними інструментами. Система генерації зображень є в основному цифровою, але деякі з оригінальних генераторів і процесорів зображень були аналоговими і залишаються у використанні.

Недоліки

Відомі об'ємні технології відображення також мають ряд недоліків, які виставляються в залежності від компромісів, обраних конструктором системи.

Часто стверджується, що об'ємні дисплеї не здатні реконструювати сцени з ефектами, що залежать від позиції глядача, таких як оклюзія і непрозорість.

Це помилка; дисплей, воксели якого мають неізотропні профілі випромінювання, дійсно здатні відображати залежні від положення ефекти. До теперішнього часу об'ємні дисплеї, здатні до оклюзії, вимагають двох умов: (1) зображення відтворюється і проектується як серія "переглядів", а не "фрагменти", і (2) поверхня зображення, що змінюється в часі, не є однорідним дифузором. Наприклад, дослідники продемонстрували об'ємні дисплеї з обертовим екраном з відбивними та / або вертикально дифузними екранами, зображення яких виявляє оклюзію та непрозорість. Одна система створила 3D-зображення НРО з полем зору 360 градусів косою проекцією на вертикальний дифузор; інший проектує 24 види на обертову поверхню з контрольованою дифузією; а інший забезпечує зображення з 12 напрямів з використанням вертикально орієнтованої жалюзі.

До теперішнього часу здатність реконструювати сцени з оклюзією та іншими залежними від положення ефектами відбувалася за рахунок вертикальної паралаксії, оскільки 3D-сцена виглядає спотвореною, якщо дивитися з інших місць, крім тих, для яких була створена сцена.

З іншого боку – велика кількість смуг пропускання, необхідна для подачі зображень на об'ємний дисплей. Наприклад, стандартних 24 біта на піксель, роздільна здатність 1024×768 , плоский / 2D-дисплей потребує близько 135 Мб / с для передачі на апаратне забезпечення для відображення 60 кадрів в секунду, тоді як 24 біта на воксель, $1024 \times 768 \times 1024$ (1024 "піксельні шари" на осі Z) об'ємного дисплея повинні були б відправити приблизно на три порядки більше (135 ГБ / с) на апаратне забезпечення дисплея для підтримки 60 обсягів в секунду. Як і у випадку звичайного 2D-відео, можна було б зменшити необхідну пропускну здатність, просто надіславши меншу кількість томів на секунду і дозволивши повторювати апаратні засоби відображення тимчасово, або надіславши лише достатньо даних, щоб вплинути на ті області дисплея, які потрібно оновити, це випадок сучасних відеоформатів з втратою стиснення, таких як MPEG. Крім того, 3D-об'ємний дисплей потребуватиме від двох до трьох порядків більшу потужність процесора та / або потужності графічного

процесора за межі необхідного для 2D-зображень еквівалентної якості, що принаймні частково пов'язано з великою кількістю даних, які необхідно створити та надіслати до відображувального обладнання. Однак, якщо видима тільки зовнішня поверхня об'єкту, кількість необхідних вокселів має бути того ж порядку, що і кількість пікселів на звичайному дисплеї. Це буде тільки у випадку, якщо воксели не мають "альфа" або значення прозорості [10].

2.5. Сучасні технології створення голограмного тривимірного зображення

I. Технологія Voxon VX1.

У технічному плані Voxon VX1 є об'ємним дисплеєм. Ядром є ультрависока швидкість цифрового світлового двигуна і високооптимізований двигун обміну. Ця унікальна комбінація апаратного та програмного забезпечення здатна проєціювати більше півмільярда точок світла кожену секунду у фізичний об'ємний простір.

Геометрія, що передається, нарізається на сотні цифрових горизонтальних перерізів перед тим, як проєктуватися синхронно на спеціально розроблений високошвидкісний зворотно-поступальний екран. Коли фотони світла потрапляють на екран, вони розсіюються і утворюють фізичне зображення поперечного перерізу в точному місці у фізичному просторі.

Через збереження зору, людське око об'єднує сотні шарів разом, і в результаті виходить справжнє тривимірне подання даних, яке можна розглядати так само, як можна було б побачити реальний об'єкт, з будь-якого кута, і без спеціальних окулярів [11].

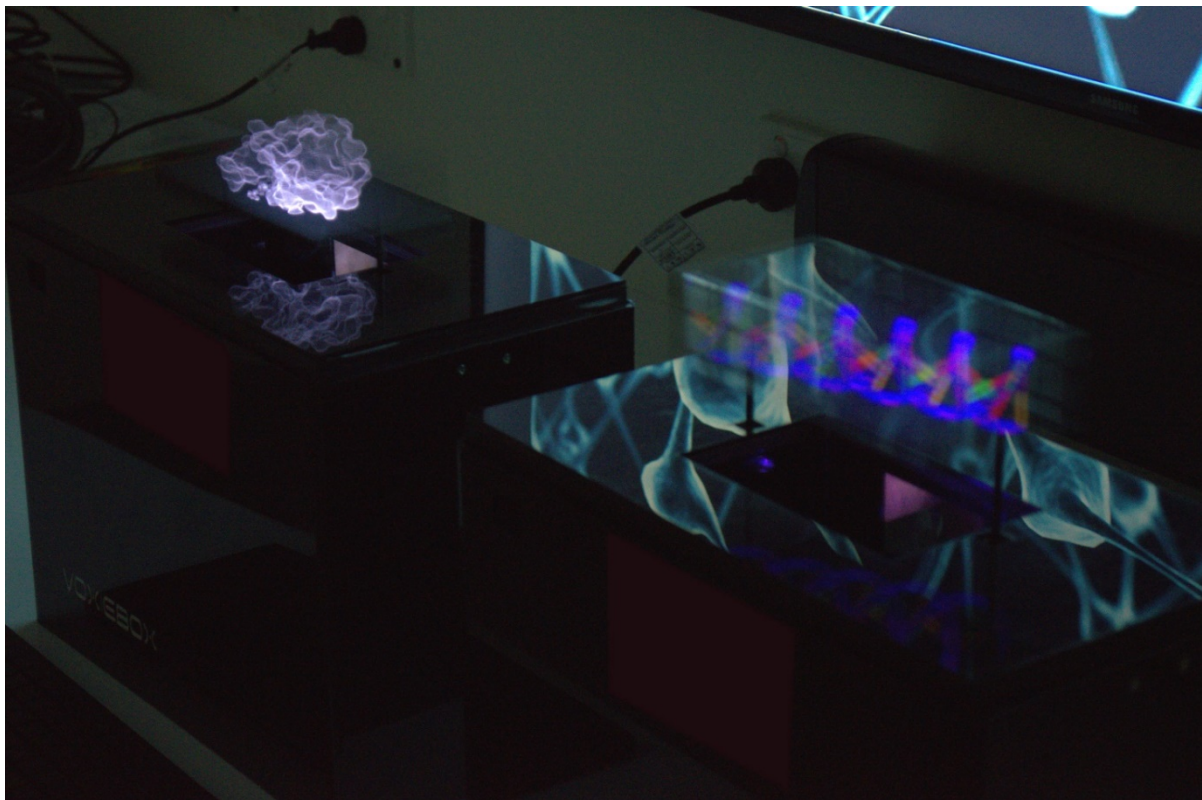


Рис. 15 [11]

II. Технологія Burton Inc.

Більшість 3D-дисплеїв до цих пір повідомляли про псевдо-3D-зображення на 2D-площинах, використовуючи бінокулярну диспропорцію людини. Однак багато проблем виникають, наприклад, через обмеження поля зору і фізіологічне невдоволення внаслідок неправильної ідентифікації віртуальних зображень.

Для подолання проблем, що виникли, було спробовано дослідити і домогтися успіху в розробці "True 3D Display", який може виробляти яскраві точки в повітрі, щоб глядачі могли бачити 3D-зображення в справжньому 3D-просторі.



Рис. 16 [12]

Цей пристрій відображення використовує явище випромінювання плазми поблизу фокусної точки фокусованого лазерного світла. Керуючи положенням фокусної точки в осях x , y і z , він відображає реальні 3D зображення, побудовані за допомогою точкових масивів у повітрі [12].

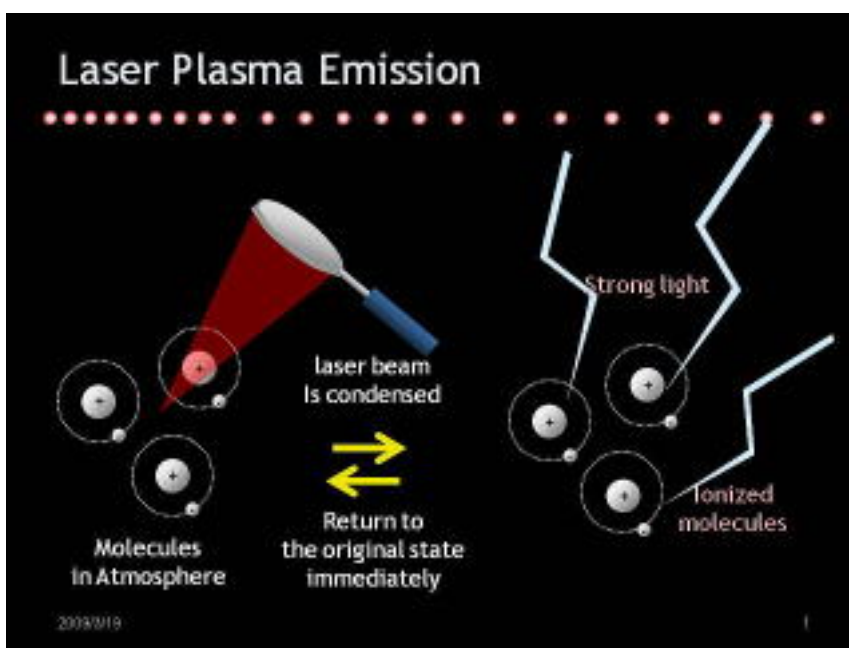


Рис. 17

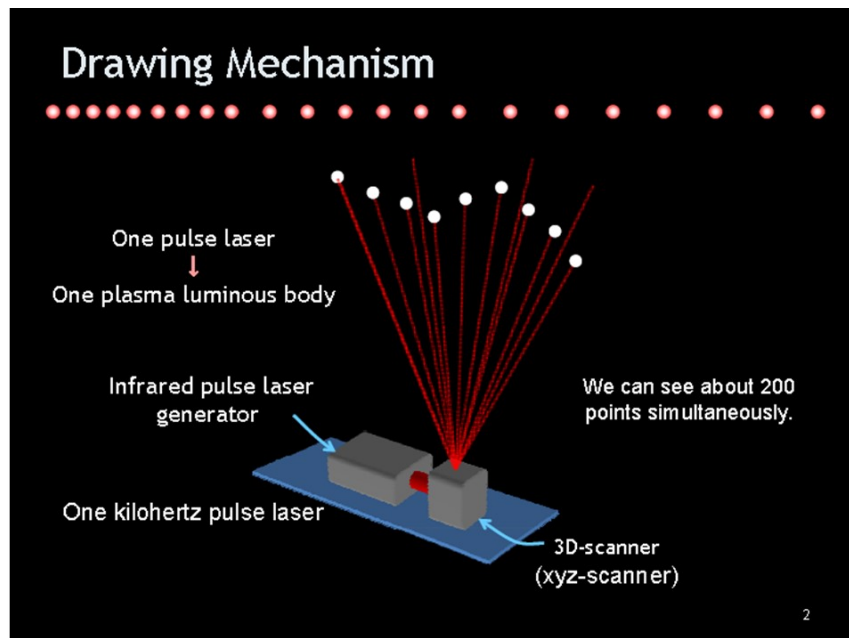


Рис. 18

III. Технологія Holovect

Holovect Mk II - це автономна об'ємна система відображення на лазерній основі, яка підходить для вашої лабораторії або робочого столу. Це ідеальний компаньйон для 3D-принтера та автономного навчального або рекламного пристрою. Holovect Mk II - це перший комерційно доступний настільний «голографічний» дисплей, здатний малювати тривимірні об'єкти у повітрі зі світлом.

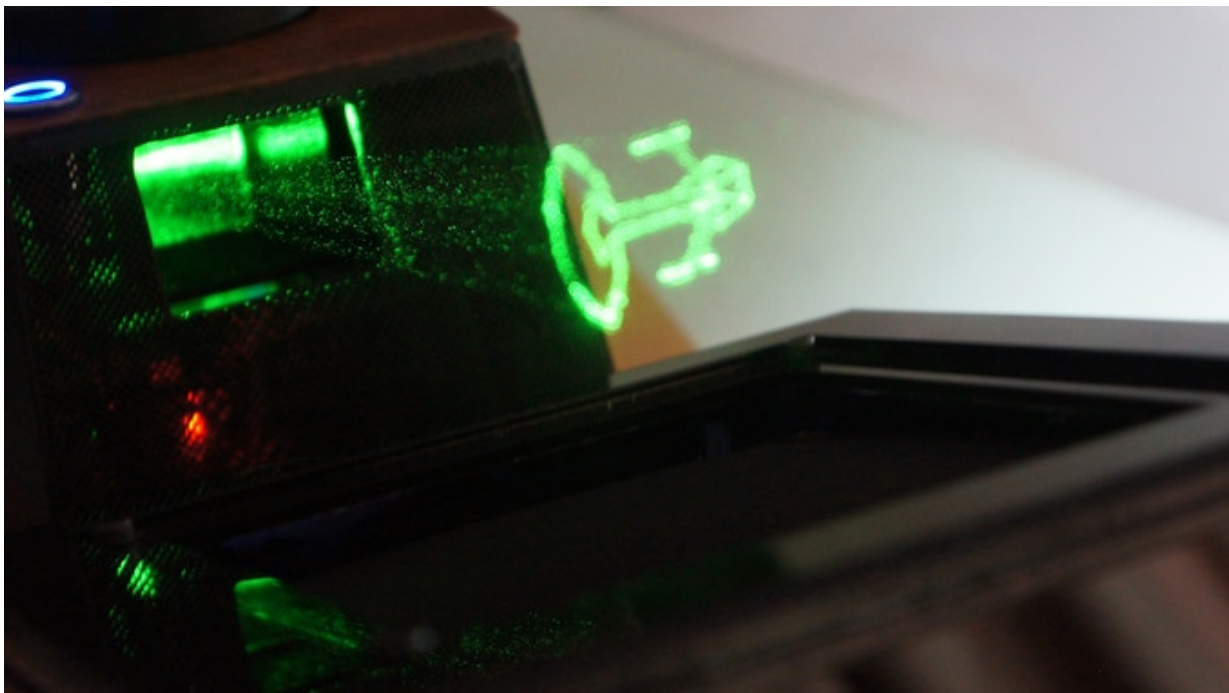


Рис. 19 [13]

Зображення Holovest HE голограми, а об'ємні векторні зображення, що проектується на модифікований повітря (тобто проекції в просторі). Ця відмінність пояснюється тим, що голограма являє собою запис інтерференційних візерунків на плівкових або скляних пластинах, що містить тривимірну інформацію про об'єкт (грецький корінь "holo" означає ціле або повне, а "грам" означає запис). Однак, оскільки зображення Holovest містять тривимірну інформацію і є вільно плаваючими об'єктами в повітрі, вони, безумовно, голографічні. Вони є реальними 3-D проекціями [13].

Технологія Mirage. Коли світло подорожує між двома різними середовищами, у більшості випадків ви отримуєте три різні ефекти до певної міри: рефракція (згинання), відбиття та / або дифузія, залежно від різного показника заломлення матеріалів. Прикладом цього є міражі, які виникають, коли частина повітря має інший показник заломлення, ніж його оточення, що спричиняє згинання світлових променів і відображається несподівано. Це може статися через перепади температури або тиску від одного регіону до іншого.

Завдяки технології holovest було придумано, як керувати повітрям у коробчатому ділянці простору, щоб точно модифікувати показник заломлення у

певних регіонах, щоб заломлювати та відбивати лазерний промінь. Ця модифікація піднімає «альбедо», яка визначається як частка падаючого світла, що відбивається поверхнею, а також рефракційні властивості на кордоні між модифікованим і немодифікованим повітрям. Тому, одночасно контролюючи напрям лазера і положення модифікованого стовпа повітря, комп'ютер може розмістити об'ємний піксель або воксель світла в будь-якому місці 3D-простору. Потім, утримуючи лазерний промінь на місці від точки А до точки В, малюється лінія, яка є 3D-вектором, і шляхом об'єднання багатьох векторів у послідовність може бути сформований голографічний векторний об'єкт. Holovest Mk II здатний малювати повне зображення 50 разів в секунду з 12 на 12 на 12 см, які утворюють куб під назвою "скринька".

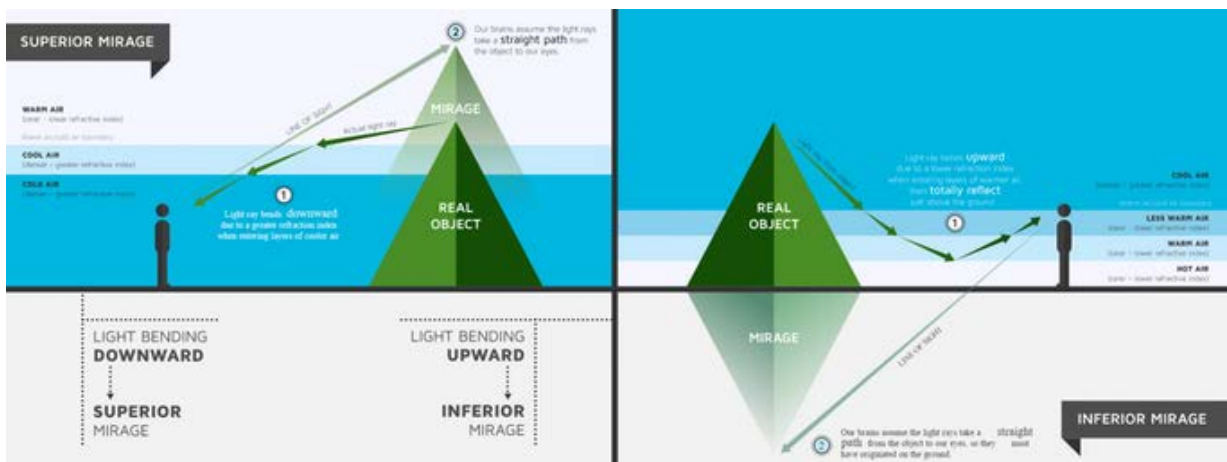


Рис. 20

Об'єкти VECTS. Об'єктами «Vect» є структури даних, яка розроблена для Holovest. Простіше кажучи, це список 3D-координат, які призводять до того, що рядки, намальовані в послідовності «голова хвіст» в просторі, складаються в об'єкти класу vect. Файли є простими та легкими у створенні за допомогою різноманітних онлайн-інструментів, електронних таблиць або старого доброго олівця та міліметрового паперу. Після завантаження вектори можуть обертатися в трьох осях і переміщатися в кубічному полотні. Ці об'єкти можна маніпулювати за допомогою ручки керування, встановити такі функції, як обертання і переміщення, або використовувати їх у власних програмах.

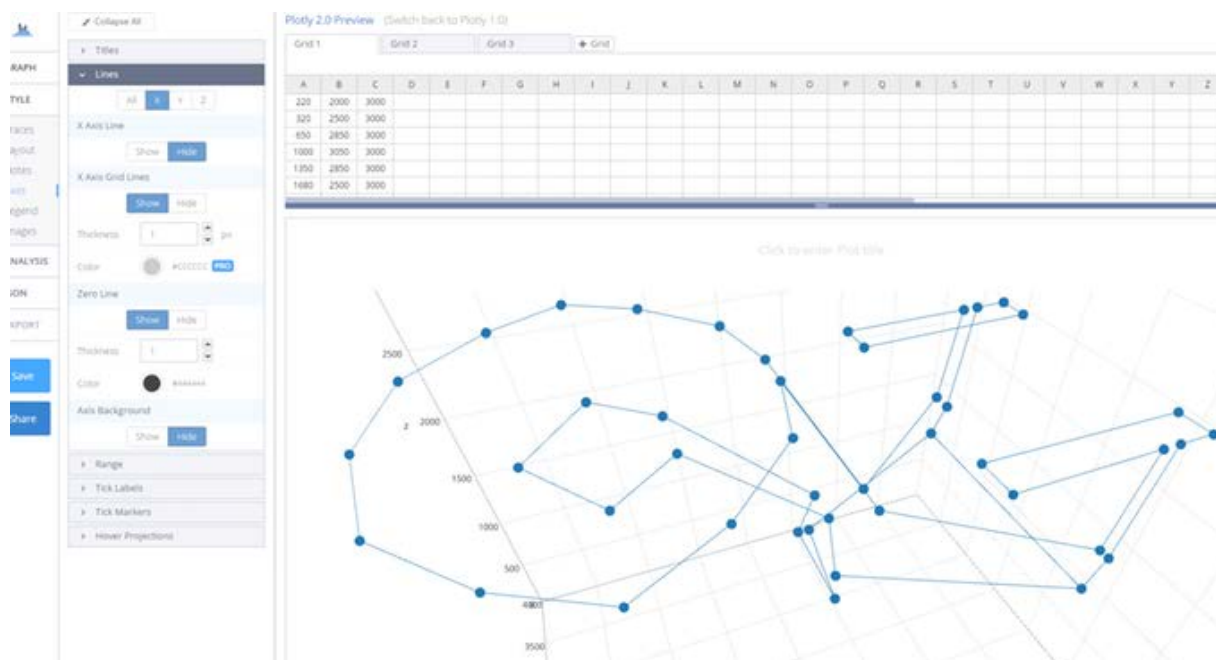


Рис. 21

3-D візуалізований друк та додатки. Holovect Mk II можна використовувати для візуалізації моделей САПР у форматі STL перед 3D-друком. Це можна зробити двома способами: імпортувати файли STL і конвертувати їх у формат vest або безпосередньо візуалізувати. Залежно від бажаної візуалізації, перетворення STL призведе до об'ємної проекції на каркасах, тоді як пряма візуалізація STL розрізає модель на шари, що ідеально підходить для перевірки потенційних помилок виробництва і перегляду внутрішньої структури в порожнистих частинах перед друком. Ця об'ємна можливість попередньої візуалізації підвищує ефективність проектування та виробництва, заощаджуючи час і друкований матеріал, перш ніж здійснювати довгий процес друку.

Інші програми включають візуалізацію 3D-даних, отриманих за допомогою 3D-сканера, або комп'ютерного томографічного сканування.



Рис. 22

Найбільшою проблемою є створення достатньої кількості підрозділів для зниження витрат та підтримання великої спільноти творців контенту.

IV. Технологія Fairy Light

Технологія використовує фемтосекундні лазери для іонізації молекул повітря і таким чином створює тріщини, фотонні випромінюючі кишенькові плазми. Ці вогні, або «воксели», можуть бути організовані в повітрі для створення рухомих, плаваючих, інтерактивних зображень.

«Феєрні вогні» долають обмеження квазіголограм і вікторіанських салонів.

Оскільки самі іонізовані молекули складають зображення, вони не потребують додаткового середовища для проектування: ніякого скла, диму або водяної пари не потрібно. (Однак вони не можуть існувати у повному вакуумі: повітря, вода або флуоресцентний розчин будуть робити.) І тому, технологія може проектувати тривимірні зображення, які можна розглядати з будь-якого кута.

Найдивовижніше те, що ці вогні є інтерактивними. Ви можете не тільки доторкнутися до них; Ви можете відчувати їх і фактично керувати ними.

Обмеження. Тепер про застереження. Безпека є проблемою. Відчуття, яке ви отримуєте від дотику до фемтосекундного лазерного зображення, насправді є супер-гарячою плазмою, облітеруючою крихтною тканиною. Дослідники наполягають, що це не є великим завданням, оскільки лазери вимикаються після 1/60 секунди, що набагато менше, ніж дві секунди, які необхідні для того, щоб викликати реальні пошкодження. Що стосується очей, команда рекомендує носити захисні окуляри.

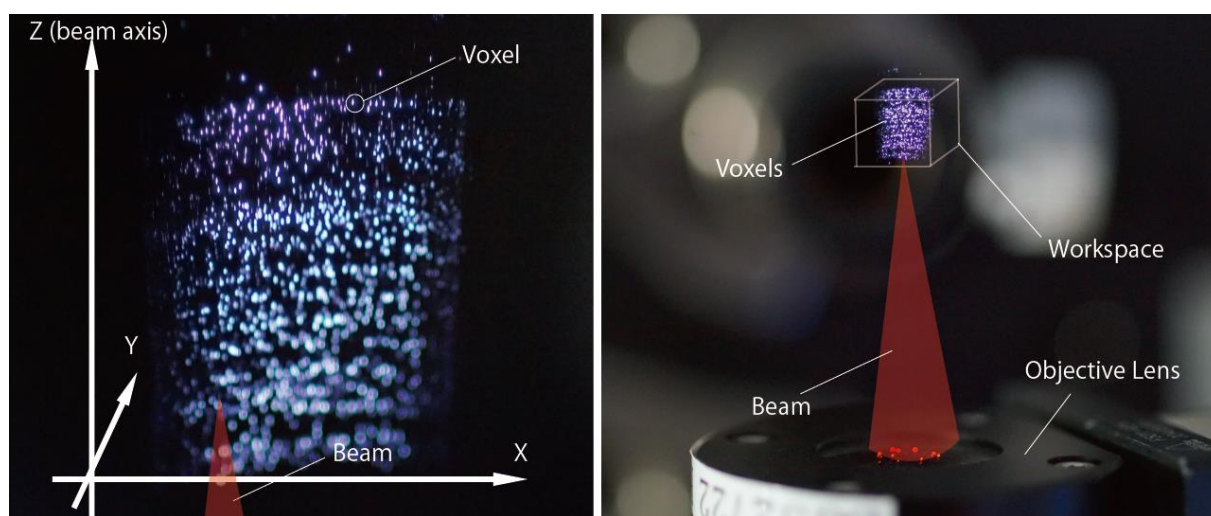


Рис. 23 [14]

Масштабованість. Дослідники відзначають оптимістичну ноту, але факт полягає в тому, що їхні «казкові вогні» в даний час є лише кубічним сантиметром в об'ємі (з 5 кубічними сантиметрами, щоб пролетіти навколо), що, ймовірно, не було естетичним вибором. Попередник нової технології, створений японською фірмою Aerial Burton, проектує набагато більше зображень за допомогою аналогічної техніки іонізації, але вони занадто небезпечні для дотику, а також значно голосніше. На даний момент, здається, ми стикаємося з компромісом між великими, небезпечними дисплеями та крихтними, інтерактивними. Дослідники, однак, стверджують, що хоча масштабованість за рахунок збільшення потужності лазера обмежується проблемами безпеки, теоретично її можна досягти, принаймні до певної міри, за рахунок скорочення ширини імпульсу.

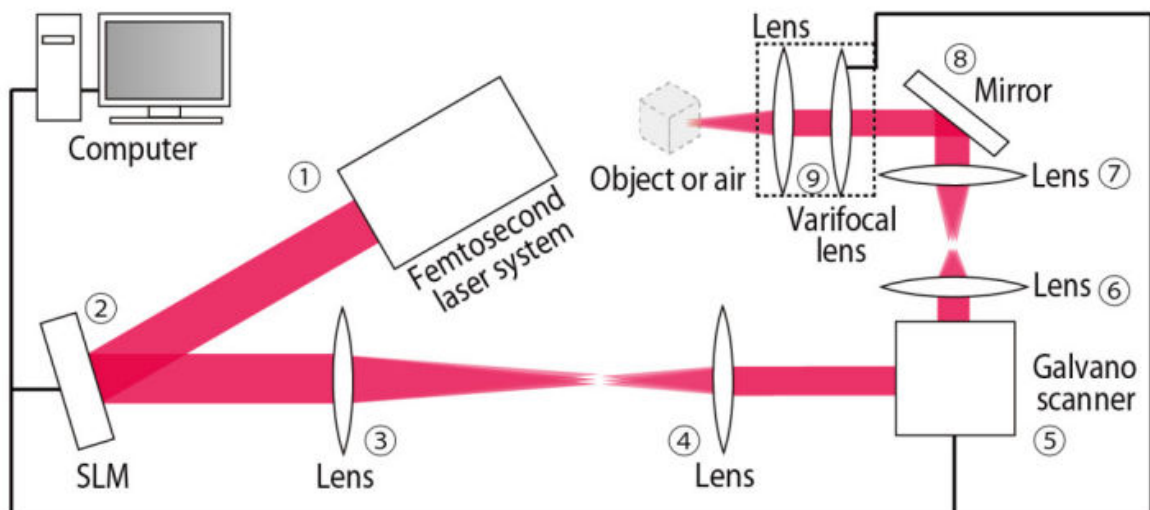
Застосування. Запропоновано, що більші небезпечні дисплеї можуть служити анімованими знаками в надзвичайних ситуаціях. Проектор досить маленький, щоб монтуватися на автомобілі, що дозволяє пропускати мобільні попередження та інструктувати панічних громадян.

Вісь z стає основним елементом фізично керованих графіків Excel. Замість того, щоб відправляти електронною поштою, ви можете фізично кинути його: коли він виходить з діапазону одного воксельного генератора, він підхоплюється наступним.

Можливо, тріскаючий звук, який на даний момент є сумним побічним продуктом реакції іонізації, може бути точно налаштований, разом з відчуттям дотику до вокселів, що дає текстурований, товстий інтерфейс, одним з яких є танцювальні голограми пізніх великих художників і тривалі судові бої з їхніми маєтками.

Японській команді вдалося створити 3D об'ємний дисплей, який ви дійсно можете доторкнутися, піднявши повітря, поки він не світиться за допомогою лазера.

Один із способів створення об'ємного, тобто справжнього 3D-дисплея, полягає у використанні лазера високої потужності і фокусування його на невеликому місці в просторі. Повітря в цьому місці буде нагріватися до місця, де він іонізується і світиться яскравим синім світлом. Сканувати лазер дуже швидко, і ви можете зробити повне 3D розташування світлових точок.



Звичайно, великою проблемою є те, що у вас багато енергії, орієнтованої на невеликі площі, і людська взаємодія може бути проблемою. Якщо ви спробували торкнутися дисплея або взаємодіяти з ним, ви можете спалитись лазером. Рішення полягає у використанні дуже швидкого лазера, фемтосекундного лазера, який нагріває невелику пляму до високої температури, але лише на дуже короткий час. Це набагато безпечніше, тому що загальна задіяна енергія менша. Це причина, чому ви можете торкнутися іскри без опіку [14].

V. Технологія Gatorade Water

Дощова установка. Наша спеціальна «дощова установка» капала воду в повній послідовності і гармонії. Вона відтворила фігуру справжнього спортсмена в рідкій анімації. Кожен блок містив 64 літри води, причому 8 одиниць працювали в будь-який час. Це означало, що ми використали половину тонни води, щоб об'єднати всю систему.



Рис. 25 [15]

Захоплення руху. Щоб зробити водяний характер справжнім до життя, ми захопили спортсмена-бігуна, стрибки і кікбоксинг. Потім дані з захоплення

руху помістили у водяну установку, щоб знати коли потрібно вмикати і вимикати насадки.



Рис. 26

Краплі води включаються і вимикаються за допомогою серії з 2048 перемикачів. Команда використовувала підсвічування для освітлення та "припинення" крапель води в повітрі. Це означало, що кожен кадр має точність мілісекунд і мікросекунди. В результаті ми передали весь шар даних через всю систему всього за одну мікросекунду.

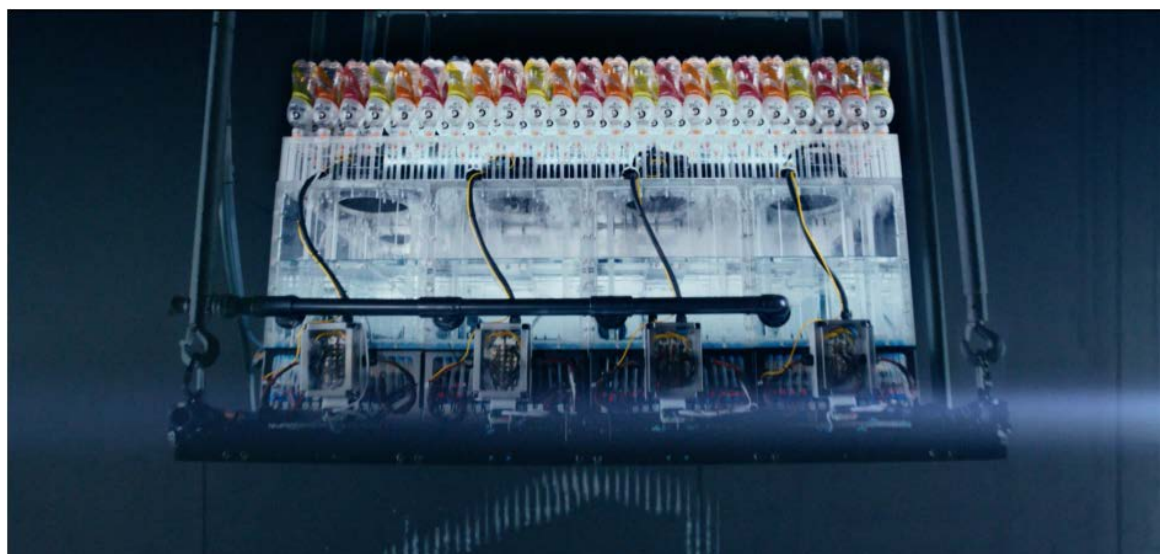


Рис. 27

Позиціонування камери. Ми повинні були взяти кожен кадр і обробляти його двома способами. Перш за все, потрібно «придушити» його, щоб компенсувати гравітаційне прискорення, і друге порізати його. Ми зберігали

дані, для кожного кадру, в блоці контролера і спрацьовували його за допомогою камери.

Для того, щоб камера розміщувалася під прямим кутом для знімка, ми запрограмували воду для синхронізації з нашою командою управління рухом. Кожного разу, коли наші спеціалісти з управління рухом встановили синхронізацію камери та спалах, вода в цей момент була скинута [15].



Рис. 28

VI. Технологія HyperVSN

Рішення «plug-and-play», з налаштуванням, що передбачає використання гвинта, що використовує запатентовану комбінацію чіпів, магнітів і світлодіодів. Коли обертаються леза зі світлодіодами, вони створюють ілюзію об'єкта, що плаває у повітрі. Мікропроцесори та датчики підбирають кут, швидкість і положення кожного з світлодіодів. Потім вони посиляють сигнали кожному з світлодіодів, щоб створити реалістичне 3D-зображення [16].

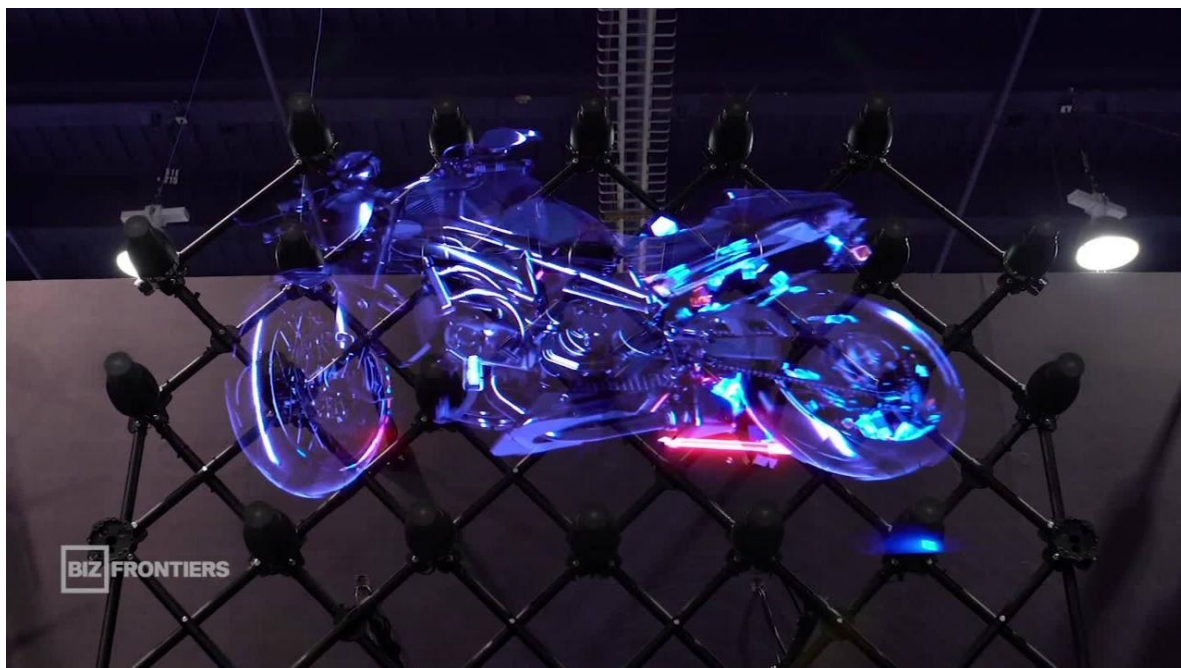


Рис. 29 [16]



Рис. 30 [16]

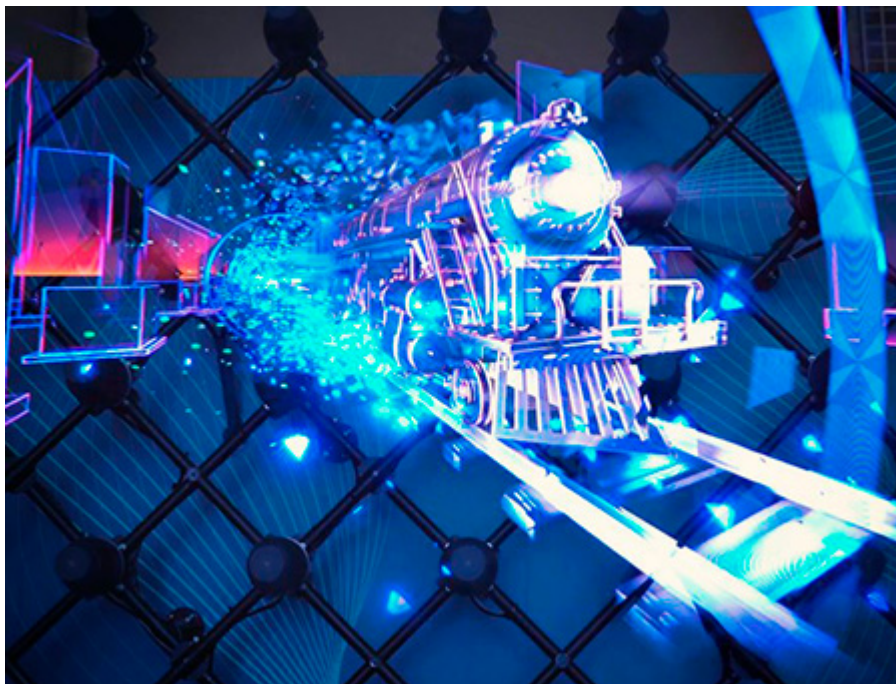


Рис. 31

VII. Технологія AtmosFX

Що таке "відкинута відстань" і як вона працює? Існують два терміни проєктора, які використовують відстань відкидання і коефіцієнт відкидання. Відстань відкидання описує можливий діапазон відстані між проєктором і поверхнею, тоді як коефіцієнт відкидання описує, який розмір зображення створює проєктор на заданій відстані.

Відстань відкидання - це фокальна відстань між проєктором і проєкційною поверхнею. Простіше кажучи, це вимірювання вказує на те, наскільки близько повинен бути проєктор до вашого вікна, стіни, матеріалу прожекції або форми 3DFX, щоб створити чітке зображення.

Відстань проєціювання проєктора зазвичай виражається, як діапазон. Наприклад, цифровий декор AtmosFX Kit має відстань від 3 до 20 футів. Використовуючи зум-об'єктив для фокусування, проєктор можна розмістити в межах від 3 до 20 футів від поверхні проєкції.

Проєктори, як правило, класифікуються як "короткий кидок" або "довгий кидок", тобто мають короткий діапазон або великий діапазон. Більшість декораторів віддають перевагу проєкторам з коротким рухом при налаштуванні

цифрових декорацій, оскільки проектор можна розмістити ближче до поверхні проєкції.

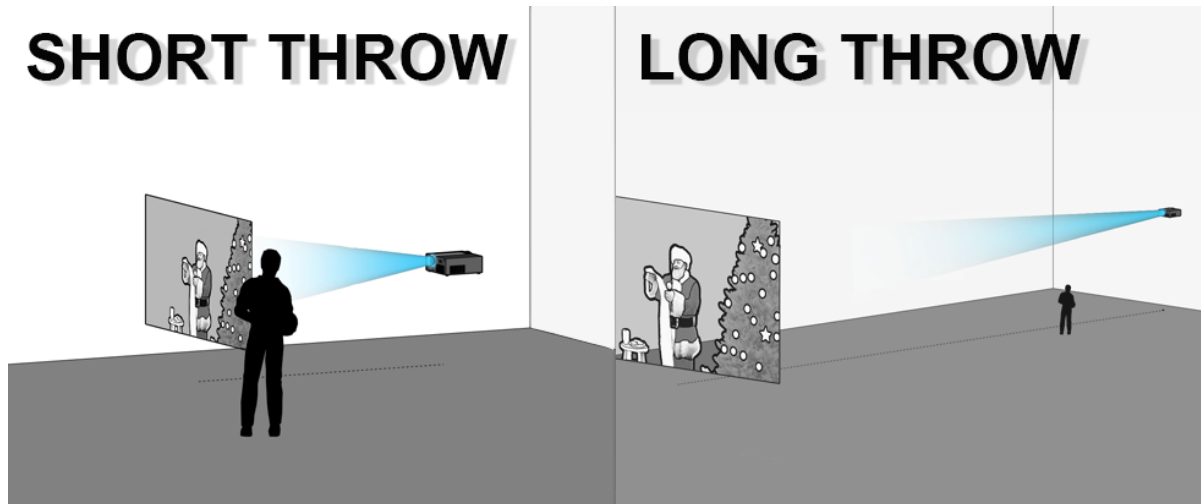


Рис. 32 [17]

Коефіцієнт відкидання. Відкидання проектора можна також виміряти, використовуючи “коефіцієнт відкидання”, який описує, наскільки проектор збільшить ваше відео на певній відстані. Дізнавшись про коефіцієнт кидання проектора, ви зможете визначити, чи буде він добре працювати для цифрового декорування, оскільки проектори з коротким рухом мають менші коефіцієнти скидання, ніж проектори з довгим рухом.

Чим менше значення коефіцієнта передачі, тим більше зображення, яке проектор буде створювати на невеликій відстані.

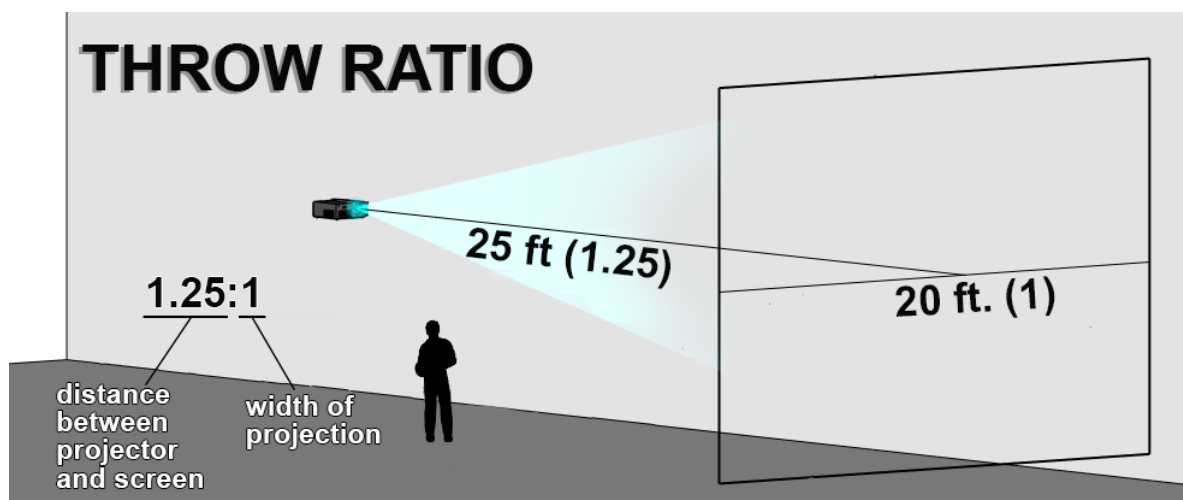


Рис. 33

Erson опублікував інструмент, який вважається дуже корисним для розуміння конкретних відстаней. Калькулятор може допомогти вам розробити уявлення про те, що відстань буде краще працювати для вас. У той час як ви плануєте свої прикраси або покупки для проекторів, це може бути неймовірно корисно підключити свої власні номери до цього калькулятора [17].



Рис. 34

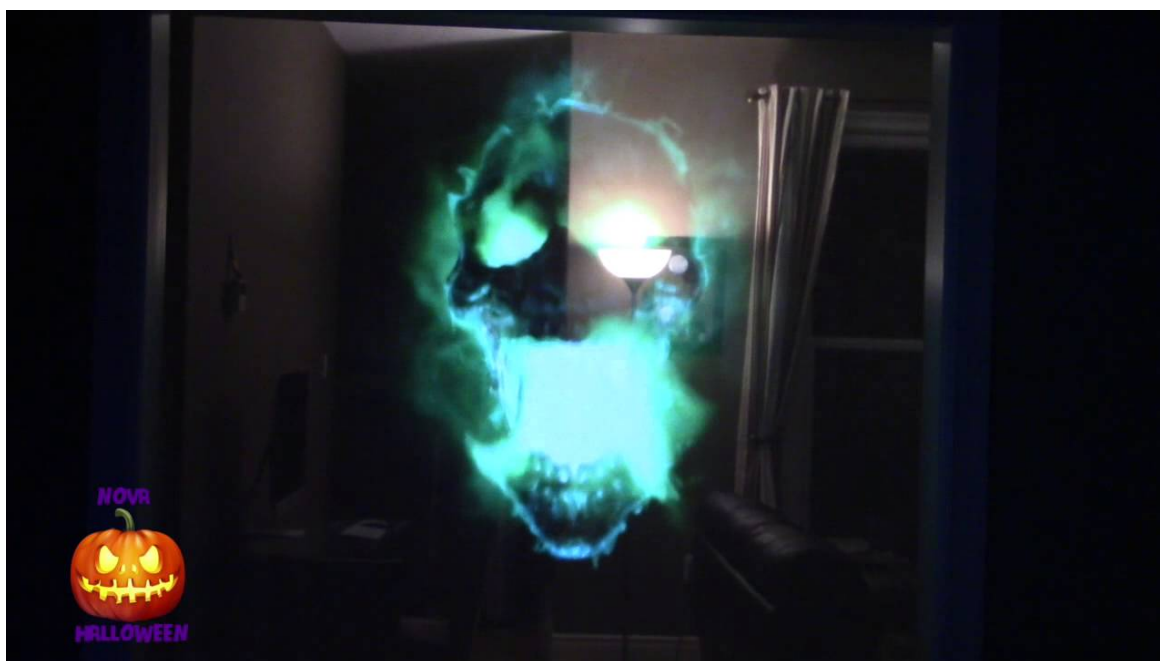


Рис. 35 [17]

VIII. Голографічні проектори

Голографічні проектори використовують голограми, а не графічні зображення для створення проєктованих зображень. Вони світять особливий білий світ або лазерне світло на або через голограми. Проєктоване світло виробляє яскраві дво- або тривимірні зображення. Хоча звичайне денне світло дозволяє побачити деякі прості голограми, справжні 3-D зображення вимагають лазерних голографічних проєкторів. Ви можете переглядати такі зображення з різних ракурсів і бачити їх у справжній перспективі. Розробляються мініатюрні версії таких проєкторів. Використовуючи такий проєктор, смартфон може створити зображення для глядача на порожньому місці, а не на невеликому екрані [18].

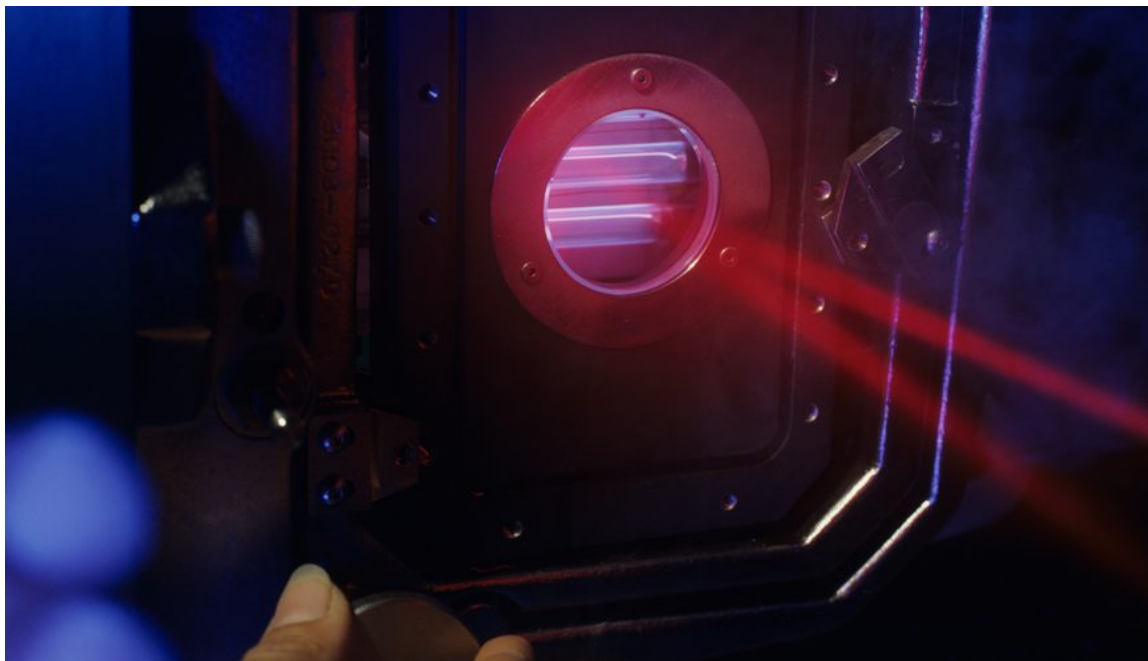


Рис. 36 [19]

Ключем до роботи голографічних проєкторів є голограма. До появи цифрових зображень голограми були зразками на плівці. Фотограф взяв одне джерело світла і розділив його на дві частини. Половина підсвічувала суб'єкта і половину йшла безпосередньо до плівки, створюючи інтерференційну картину з відбитим від об'єкта світлом. Голографічний проєктор використовував подібне світло і фільм для відтворення зображення суб'єкта.

До 2004 року цифрові дисплеї змогли створити такі інтерференційні структури і зайняти місце голограми на плівці. Це означало, що компанії могли б розпочати роботу над проектуванням відео на голографічних проекторах. Проектор світить лазери або чисте біле світло через цифровий дисплей, який запрограмований з інтерференційними візерунками, відповідними серії зображень. Процес створює зображення перед проектором, пропускаючи світло через інтерференційну картину.

У традиційних проекторах світло проходить через графічне зображення, яке блокує частину світла для створення затінення, і дозволяє лише окремим кольорам промальовувати зображення. Голографічні проектори генерують проєційоване зображення за рахунок рефракції через інтерференційну картину, втрачаючи практично будь-яке світло, і працюють набагато ефективніше. Вони можуть бути дуже маленькими і генерувати дуже мало тепла. Це робить їх ідеальними для можливих застосувань у мобільних електронних пристроях, для яких потужність і простір обмежені.

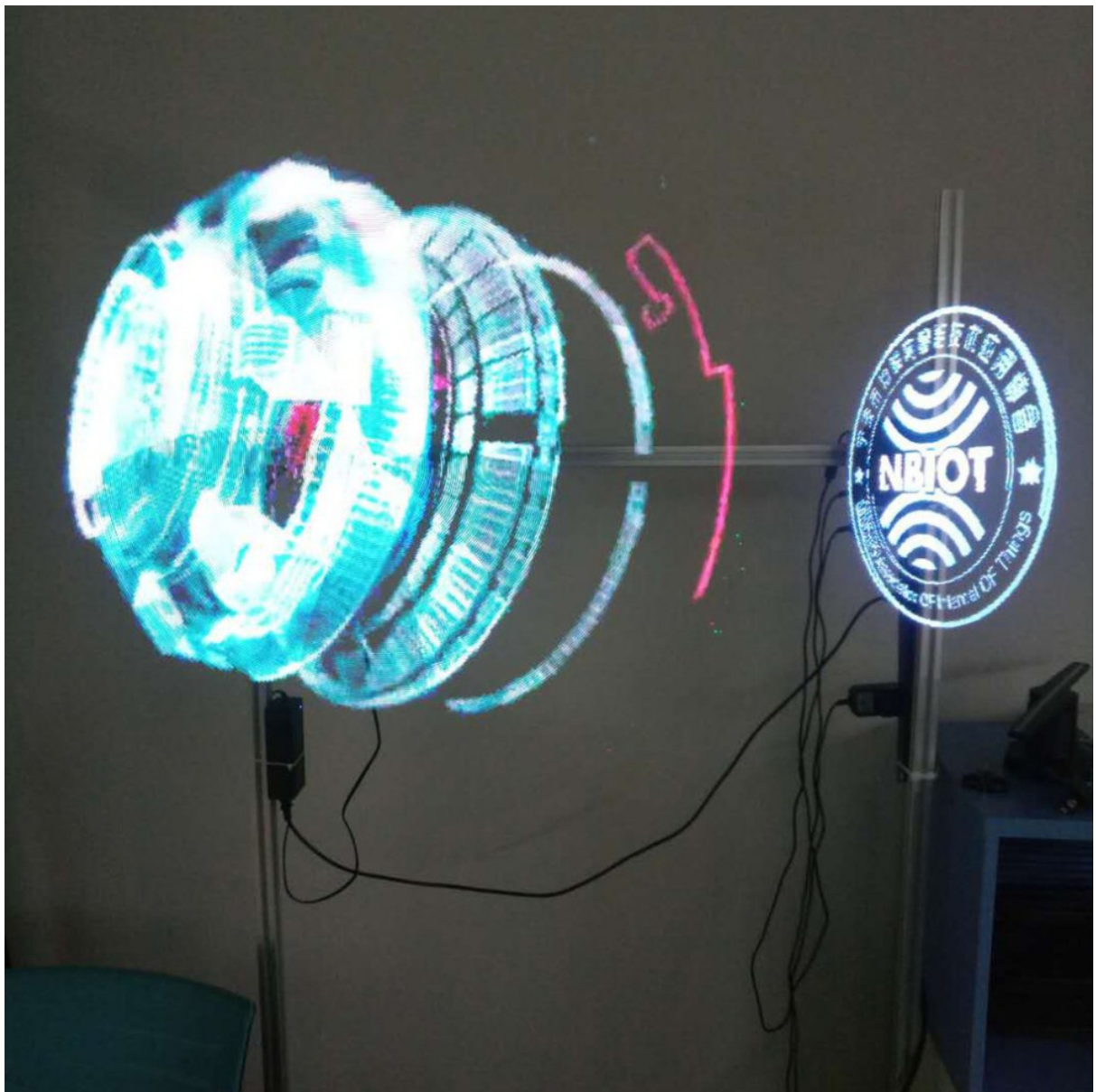


Рис. 37 [19]

Голограма або цифрова голографічна інтерференційна картина працює тільки з одним кольором, оскільки інтерференційна картина виникає через перешкоди від однієї довжини хвилі світла. Для отримання кольорових голографічних проекторів необхідно використовувати кольорові лазери, які підсвічують відповідні інтерференційні структури для їх кольорів. Станом на січень 2012 року такі голографічні проектори знаходяться на стадії розробки.

Простий голографічний проектор з джерелом світла, що просвічується через плоску інтерференційну картину, може створити зображення, яке має тривимірні якості, але воно ще є плоским. Щоб створити справжнє 3-D зображення, голографічний проектор може використовувати спінінгове

дзеркало для відображення зображення до спостерігача. Дзеркало відправляє зображення, що відповідає куту, з якого спостерігач переглядає об'єкт. Коли спостерігач рухається навколо суб'єкта, він переглядає його в різних точках зору і бачить тривимірне зображення, що плаває в просторі [18].

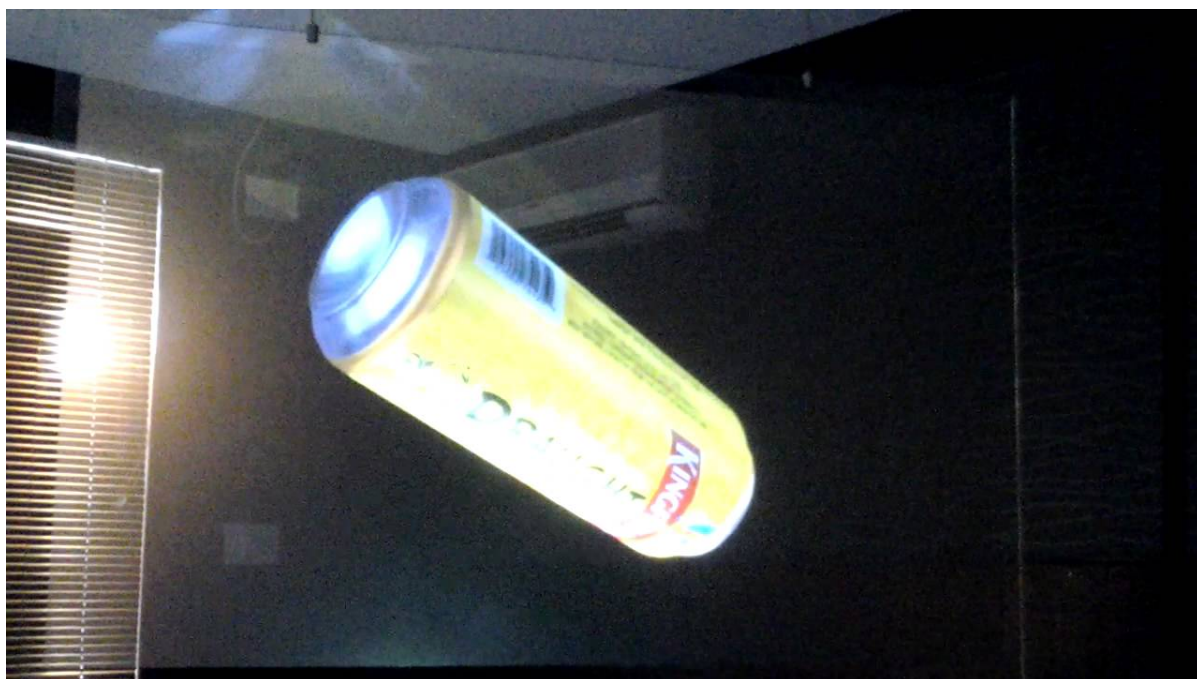


Рис. 38 [19]

РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД ФОТОРЕФРАКТИВНИХ КРИСТАЛІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Фоторефракційні голограми десятиліттями привертали велику увагу завдяки своїй трансмісійній геометрії та динамічній природі. Механізм PR включає генерацію заряду, перенесення заряду, уловлювання заряду і модуляцію показника заломлення. До теперішнього часу фоторефрактивна голограма вважається одним з найважливіших голографічних матеріалів з динамічними особливостями. Оскільки перший механізм PR був описаний близько 50 років тому, багато дослідників проводили великі дослідження, і передбачається, що PR-матеріали стануть центром дослідження оптико-електронних матеріалів у найближчому майбутньому. У цій главі розглянуто сучасне розуміння механізму, що відповідає за вплив PR та поточні тенденції досліджень, а також коротко введено останні досягнення в області застосування та розробки матеріалів.

На відміну від типових «повсякденних» голографічних зображень, які є рефлексивними і квазіпостійними в природі, фоторефрактивні (PR) голограми відрізняються пропускаючою геометрією і динамічним характером. Голограма PR може бути записана, стерта з рівномірним освітленням, і переписана, або може бути квазіпостійною за певних умов. Ця динамічна природа відрізняє голографію від інших класичних голографічних методів. Ефект PR передбачає формування поля просторового заряду, E_{sc} , під неоднорідним підсвічуванням і подальшою модуляцією показника заломлення n .

Формування E_{sc} можна додатково поділити на три процеси; генерування заряду за освітлення, перенесення заряду і захоплення заряду. Генерація заряду при освітленні здійснюється шляхом додавання фотосенсибілізатора, який може бути фотозбуджений на робочій довжині хвилі. Транспортний заряд досягається за рахунок включення фотопровідного полімеру або молекулярного виду. При цьому фотогенеровані заряди транспортуються в межах зовнішнього

прикладеного електричного поля, E , і переважає механізм дрейфу. Захоплення заряду зазвичай здійснюється окисними домішками і недосконалістю.

Отриманий ESC модулює n для створення дифракційної решітки або голограми. Модуляція в n здійснюється за рахунок включення нелінійного оптичного (NLO) хромофору або барвника (так названого внаслідок їх сильного поглинання у видимому спектрі). Нелінійність хромофору, як правило, пов'язана з її двопробеневим заломленням, однак лінійний ефект Паккеля може також бути значним.

Примітно, що кожна функція залежить від окремих складових, а PR-композити можуть бути легко спроектовані та модифіковані для конкретних застосувань.

Ефект PR не локальний за своєю природою і відрізняє фоторефракційність від інших форм голографії, які спираються на різні локальні механізми, такі як, фотохромізм, терморефракція, і термохромізм. Унікально для ефекту PR, ESC має зсув по фазі, в ідеалі на $\pi/2$ щодо візерунка освітлення. Цей фазовий зсув може призвести до асиметричного перенесення енергії між двома променями, що падають, і зазвичай називається асиметричним двопробневим зв'язком (ТВС). Коли ТВС є достатньо сильним, енергетичний приріст перевищує втрати, пов'язані з поглинанням і відбиттям, і, отже, може відбуватися оптичне посилення.

Історія [20]. Перше спостереження PR було зроблено в кристалічному $LiNbO_3$ в 1966 р., але в той час спостережувана деколімація пучка пояснювалася пошкодженими оптичними компонентами. У 1967 р. подібні ефекти спостерігалися в сегнетоелектричних кристалах $KTa_{1-x}Nb_xO_3$ (КТН) і визнавалися, як ефект PR. Проте синтезувати неорганічні кристали PR важко і дорого, і їх спектральна реакція залежить від їх власних характеристик поглинання. У обмежених випадках можна вносити маніпуляційні характеристики поглинання шляхом допінгу, але часто зустрічаються серйозні недоліки, такі як легуюча домішка, яка витісняється під час приготування

кристалу. Навпаки, органічні PR-матеріали вимагають простих, гнучких процесів виготовлення, що дає можливість поліпшити продуктивність.

Найбільш ранню PR-активність в органічному матеріалі спостерігали в кристалі NLO 2-циклооктиламино-5-нітропіридин (COANP), легованому 7,7,8,8-тетраціанохинодиметаном (TCNQ) у 1990 році. Утилізацію цього матеріалу перешкоджала нестабільність допанта. З іншого боку, легування полімерних або мономерних матеріалів типу PR може бути відносно простим, і фактично гнучкість обробки є однією з найбільш значних переваг, пов'язаних з цими матеріалами. Полімерні PR матеріали можуть легко формуватися в тонкоплівкові різної товщини в залежності від конкретних вимог. Перший полімерний PR-матеріал був сформований в 1991 році і складався з епоксидного полімеру NLO, полі (бісфенол-А-диглицидиловий ефір 4-нітро-1,2-фенилендіамин) (біса-NPDA), легований 30% мас. транспортуючий агент, диетиламинобензальдегід дифенілгідрозон (DEN).

Завдяки нещодавньому прогресу в нанотехнологіях, фотосенсибілізаційні полімерні композитні матеріали для полімерів тепер доступні з нанорозмірними напівпровідниковими матеріалами, які відомі як квантові точки або Q-точки. Перший такий приклад передбачав фотосенсибілізацію композиту на основі полівінілкарбазолу (PVK), легованого Q-точками CdS у 1999 році. Згодом фотосенсибілізація PR полімерних композитів з Q-точками була зосереджена на CdSe та CdS для використання на видимих довжинах хвиль, а PbSe та PbS для використання при близьких ІЧ-хвилях. Зовсім недавно фотосенсибілізація PR-композитів, що містять невеликі кількості Q-точок і Alq3 (трис (8-гідроксифінолато) алюміній) в якості другого фотосенсибілізатора, як повідомлялося, має час відреагування в мілісекундах, τ , і супер-ефективність, що є проривом у цій галузі протягом десятиліть, які залишалися застійними.

3.1. Механізм фоторефрактивності

На рис. 39 показаний мікроскопічний механізм, що відповідає ефекту PR:

а) освітлений фотосенсибілізатор генерує вільні носії заряду, б) фотогенеровані дірки переносяться в транспортуючий матеріал, де вони можуть мігрувати під впливом E в темні смуги освітленого зразка, в) носії заряду стають захопленими в темних смугах, г) результуючий ESC модулюють шляхом додавання хромофору NLO.

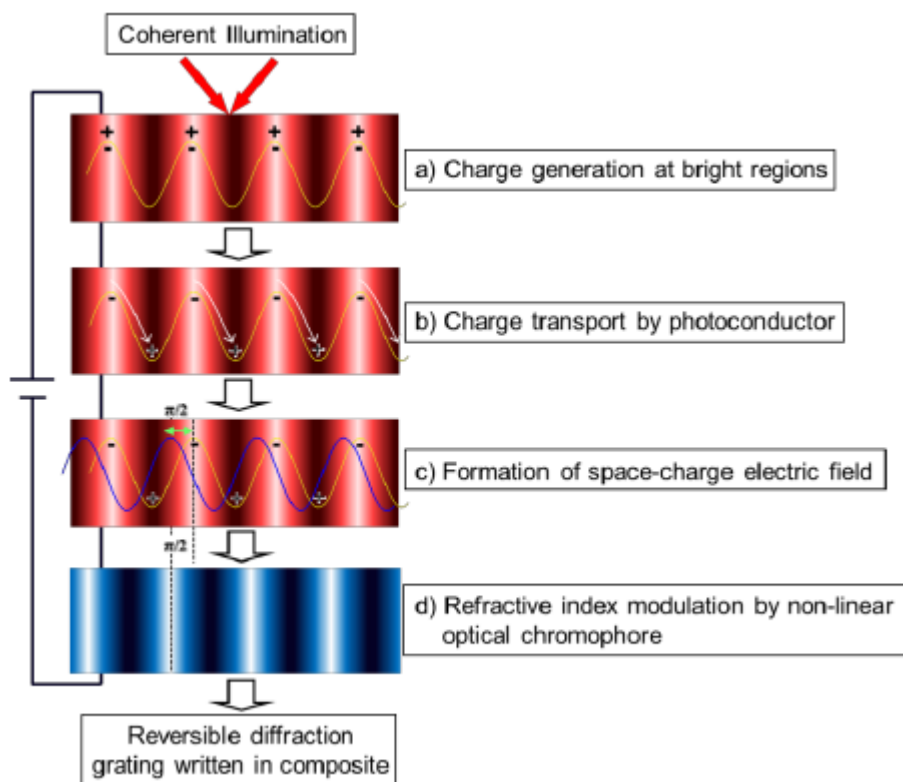


Рис.39 Механізм фоторефрактивного ефекту [20]

Фоточутливість. Перший процес, необхідний для PR - генерація вільних носіїв заряду, і це може бути досягнуто за рахунок включення видів, здатних до оптичного поглинання при довжині хвилі, яка підходить для PR композитів. Через обмеження, пов'язані з C60 та іншими органічними фотосенсибілізаторами, Q-точки привернули значну увагу з огляду на їх потенціал, як фотосенсибілізаторів PR-композитів. Хоча цей новий клас неорганічно-органічних гібридних полімерних композитів має величезну перспективу, технологія все ще перебуває у зародковому стані, і необхідні подальші дослідження для використання його повного потенціалу.

Експлуатаційні напруги, дифракційні ефективності та τ неорганічних органічних композицій не збігаються з їхніми органічними аналогами і повинні бути вдосконалені, щоб відповідати вимогам проєктованих застосувань.

Для вирішення цих проблем необхідно з'ясувати фундаментальні механізми генерування фотозарядів і транспортування цих зарядів, а також розробити інноваційні методи, що дозволять оптимізувати показники PR для конкретних застосувань. Ця оптимізація може бути здійснена шляхом варіювання стехіометричних співвідношень складових і ретельного вибору властивостей Q-точок.

Мабуть, найбільш привабливим аспектом використання Q-точок як фотосенсибілізаторів є їхня перебудова в робочій довжині хвилі. Ця властивість походить від зворотної кореляції між оптичною смугою і фізичними розмірами Q-точок (ефект квантового обмеження) і призводить до синього зсуву в спектрі поглинання даного матеріалу, оскільки розміри зменшуються за межі пов'язаного радіуса Бора. Для CdS ефект квантового обмеження виникає, коли розмір частинок менше, ніж ~ 6 нм. Спектри поглинання QPbS різного розміру мають синій зсув, пов'язаний з квантовим обмеженням, що також викликає зміщення кольору QCdSe від темно-коричневого до жовтого. Крім того, оскільки Q-точки значно менші за довжину хвилі видимого світла, їх включення не впливає негативно на оптичні якості композитів PR.

Хоча Q-точки спочатку були призначені для цілей фотосенсибілізації, подальші дослідження показали, що композити, що містять Q-точки, також мали інші потрібні характеристики. Найбільш помітним було збільшення рухливості носіїв заряду, τ , що пов'язано з більш швидким PR τ . В додаток до цього збільшення τ , включення Q-точок також було пов'язане з випадковим зменшенням дифракційної ефективності, яка була приписана схильності Q-точок до дії як пастки заряду. Проте останні дослідження показали, що цей згубний ефект можна звести до мінімуму, використовуючи відносно вузькі напівпровідники з розривом смуги, оптимізуючи як ефективність, так і τ . У репрезентативному композитному PR, заміщення QCdSe, що має відносно

широку смугу, з QCdTe, що має порівняно більш вузьку смугу, призвело до поліпшення швидкої постійної часуу τ_f , що зазвичай приписується формуванню E_{sc} , яка була реалізована (рис. 40).

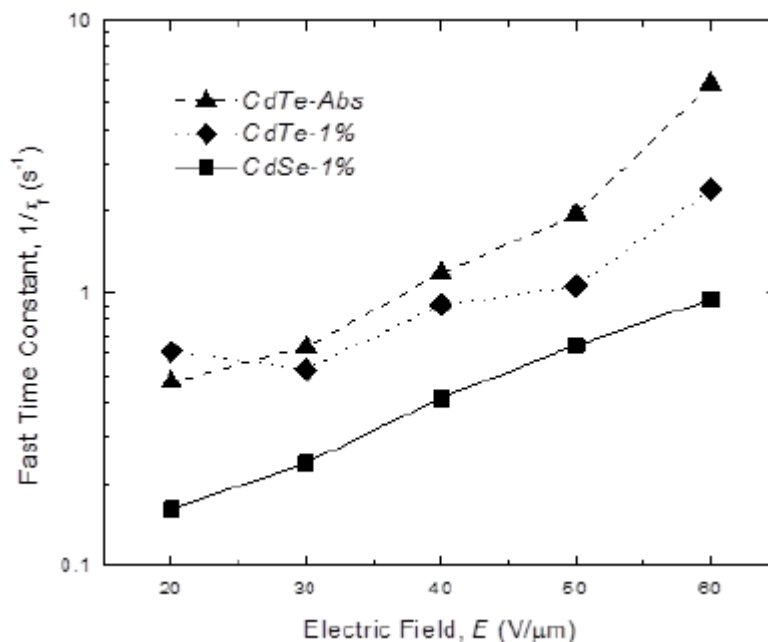


Рис. 40. Залежність електричного поля від часових констант, τ_f величин зростання решітки для CdSe - 1% (квадрати), CdTe - А (трикутники) і CdTe – 1% (алмази) при $\lambda = 633$ нм [20]

Коли Q-точки використовуються в якості фотосенсибілізаторів у PR-композиціях, вони зазвичай ретельно синтезуються, так що енергія, пов'язана з їх першим екситоном (або, як правило, E_g), про що свідчить пік в спектрі поглинання, збігається з передбачуваною експериментальною довжиною хвилі. Тим не менш, Q-точки PbS з першим екситоном, що відбуваються при ~ 1200 нм, були використані для фотосенсибілізації композиту PR при 633 нм. Хоча пік першого екситону не відбувається при 633 нм, Q-точки PbS мають дуже великий поперечний переріз поглинання при 633 нм. Необхідність синтезу Q-точок з певним розміром, а отже, і специфічною смугою, може бути значно розширена цим підходом «не-резонансу».

Рух заряду. Другий процес PR передбачає транспортування фотогенерованих зарядів. Оскільки отвори пов'язані з матрицею транспортування заряду, вони є рухомих видом. Навпаки, електрони пов'язані з фотосенсибілізатором, який не утворює суцільну матрицю, і, таким чином, електрони є нерухомих в цьому типі PR композиту, хоча можна виготовити композити, в яких ролі електронів і дірок змінені. Оскільки значення μ дірок і електронів розрізняються, може виникнути внутрішній розподіл просторового заряду. μ дуже сильно залежить від електричного поля, E , і температури, T , як показано нижче:

$$\mu = a_0 \rho^2 \exp(-2\rho/\rho_0) \exp\left(\frac{-\Delta}{kT}\right) \exp\left[\beta\sqrt{E}\left(\frac{1}{kT} - \frac{1}{kT_0}\right)\right], \quad (15)$$

де a_0 - константа, β і T_0 - параметри підгонки даних, ρ - розрахункова середня відстань між молекулами легуючих домішок, k - константа Больцмана, ρ_0 - довжина розпаду хвильової функції, а Δ - енергія активації нульового електричного поля.

Хоча фотосенсибілізація була головною мотивацією для включення Q-точок в інші органічні PR-композити, експериментальні результати, особливо такі, що характеризуються часом польоту (TOF), показують, що крім того, що вони діють як фотосенсибілізатор, Q-точки збільшують зарядову μ в композиті. Це підвищення в μ в першу чергу пояснюється здатністю вільних носіїв заряду входити, а потім транспортуватися через включені Q-точки, де вони затухають швидше μ відносно того, що приписують звичайним органічним видам транспортування заряду. Крім того, це покращення в згодом призводить до скорочення PR. Незважаючи на цей прогрес, до недавнього часу $\tau > 100$ мс представляли найкращий PR τ повідомлялося про органічний композит, фотосенсибілізований Q-точками, і це майже на два порядки більше, ніж повідомлялося для PR композитів фотосенсибілізованих органічними фотосенсибілізаторами, такими як C60. У недавньому дослідженні показано фотосенсибілізацію PR-композиту при $\lambda = 633$ нм, що містить QPbS. Виявлено, що QPbS демонструє значне, але нерезонансне поглинання і призводить до τ

$\ll 40$ мс і дифракційної ефективності, порівнянної з такою, що спостерігається у всіх органічних PR композитах. Крім того, як зазначалося вище, Q-точки з більш вузькою смугою також відчують поліпшення.

Види транспортування зарядів в основному регулюють τ у складі PR. Недавні дослідження показують, що заміщення PVK на TPD-видах призводить до поліпшення показників PR. Це можна пояснити декількома факторами, включаючи більш високий μ , пов'язаний з TPD. Крім того, TPD легше іонізується, ніж PVK, оскільки HOMO TPD лежить на більш високому енергетичному рівні, ніж PVK (приблизно 5.43 eV проти 5.92 eV, відповідно). Крім того, коли PVK використовується в у поєднанні з деякими NLO-барвниками, такими як 7-DCST, який має HOMO приблизно -5,92 eV, енергетично сприятливо для позитивно заряджених отворів захоплюватися в молекулах 7-DCST, тоді як у випадку ТПД такого немає.

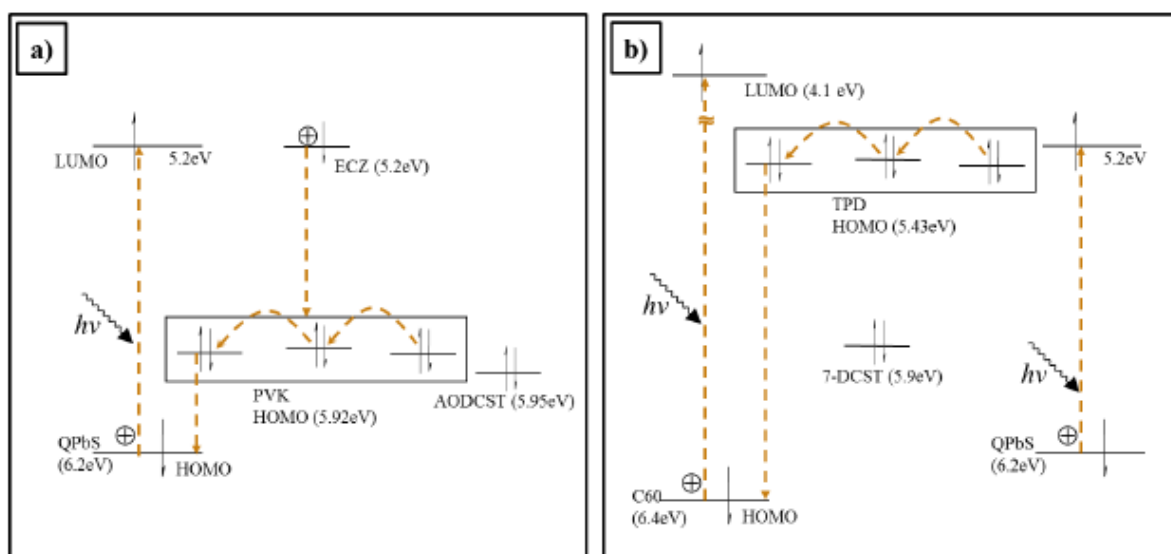


Рис. 41. Електронні стани (а) PVK та (b) композити на основі TPD. AODCST і 7-DCST використовувалися, як хромофори NLO, і C60 та/або QPbS як агенти, що передають сенсibilізатор/заряд. [21] [22]

Внаслідок посиленого носія заряду, пов'язаного з матеріалами TPD на основі PR, у поєднанні з меншою енергією валентної зони, ніж у PVK, повідомляється про більшу ефективність і менший τ (рис. 41). Оскільки TPD і

його молекулярні похідні мають високу схильність до фазового розділення і в кінцевому підсумку кристалізуються у твердому розчині з низьким T_g , що знижує оптичну якість PR-пристроїв, полімеризованих форм TPD, таких як, полі (акриловий тетрафенілдіамінобіфеніл) (PATPD). У PATPD фрагмент TPD являє собою підвісний фрагмент, приєднаний до інертної основи, і інертний підвісний зв'язок, що знижує ефективність композиту PR за рахунок додавання неефективного об'єму. Однак, як показано, N, N -біс (3-метилфеніл) - N, N -дво (феніл) бензидин (DMTPD), у поєднанні з відповідним чином вибраними компонентами, змішаними у належному співвідношенні, утворює стабільний PR композит, в якому молекулярна TPD діє як основний транспортно зарядовий вид. Використовуючи цей підхід, можна усунути інертну основу (ланцюг), а також підвісний зв'язок, пов'язаний з полімеризованими формами TPD, що значно збільшує навантаження активних компонентів і покращує роботу PR. Цей підхід також дає композит, який не вимагає додавання інертного пластифікатора для забезпечення бажаного двошпроменевого заломлення, пов'язаного з переорієнтацією барвника NLO у м'якій матриці, що додатково дозволяє збільшити навантаження активних компонентів.

Захоплення заряду. Фотогенеровані заряди мігрують під впливом E в більш темні області середовища, яке освітлене, та в якому переважає дрейф. Захоплення заряду зазвичай виконується без будь-яких добавок, досить окислювальних домішок і недоліків, щоб забезпечити цю функціональність. Цей процес призводить до створення E_{sc} , що виражається як

$$|E_{sc}| = m \cdot E_q \cdot \left[\frac{E_0^2 + E_d^2}{E_0^2 + (E_d + E_q)^2} \right]^{1/2} \cdot \frac{1}{1 + \sigma_d / \sigma_p} \quad (16)$$

де m - глибина модуляції, E_0 - компонент E , що збігається з структурним вектором, E_q - величина E_{sc} , обмежена щільністю пасток, а E_d - величина дифузійного поля. σ_p і σ_d - фотопровідність і темна провідність відповідно і обчислюються з використанням:

$$\sigma = J/E, \quad (17)$$

де J - експериментально визначена щільність струму.

Остаточний процес, пов'язаний з ефектом PR, передбачає модуляцію n в межах встановленого ESC . Це досягається шляхом додавання NLO барвника другого порядку, такого як 2- [4-дво(2-метоксиетил)аміно]-бензилиденмалононитрил (AODCST) з великим дипольним моментом основного стану, сильним двошпроменевим заломленням і часто здатним виявляти значний ефект Поккеля внаслідок великої першої гіперполяризуємості. Дипольні хромофори здатні орієнтуватися в межах E , а також внутрішнього ESC , і ця модульована орієнтація перетворюється на модуляцію об'єму n . Величина модуляції n задається рівнянням:

$$\Delta n = -\frac{n^3 r_{eff} E_{sc}}{2}, \quad (18)$$

де r_{eff} - ефективний коефіцієнт EO . Періодичні зміни ESC призводять до відповідних варіацій модуляції n , і ця модуляція являє собою PR-решітку або голограму. Оскільки зсув фаз між малюнком освітлення та модуляцією n ненульовий, то решітка нелокальна за своєю природою і призводить до асиметричного переносу енергії.

Орієнтація хромофору в межах E і ESC схематично зображена на рис. 42. PR-голограми можуть бути квазіпостійними, коли матеріал має T_g вище, ніж навколишнє T . Тут, зразок спочатку нагрівається до T_g , а потім пишеться голограма. У той час як пучки запису все ще присутні, зразок охолоджується нижче його T_g , "заморожуючи" хромофори на місці. Для динамічної природи ефекту PR, що підлягає спостереженню, T_g матеріалу має бути нижче температури навколишнього середовища та може бути придушеним розумним вибором спів-складових.

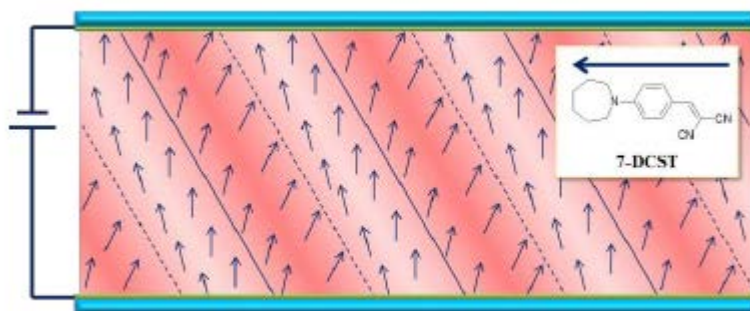


Рис. 42. Орієнтація NLO хромофору (7-DCST) під впливом E та E_{sc} [20]

3.2. Експериментальні методи

Вимірювання фотопровідності. Характеристики σ_p можуть бути зроблені за допомогою простої техніки постійного струму з використанням електрометра, який використовується для вимірювання падіння напруги на навантажувальному резисторі, як функція E від освітлення. На рис. 43 показана схема експерименту. σ_d також може бути виміряний за допомогою цієї методики. Для вимірювання σ_d застосовується E без освітлення, і струм встановлюється в стаціонарний стан.

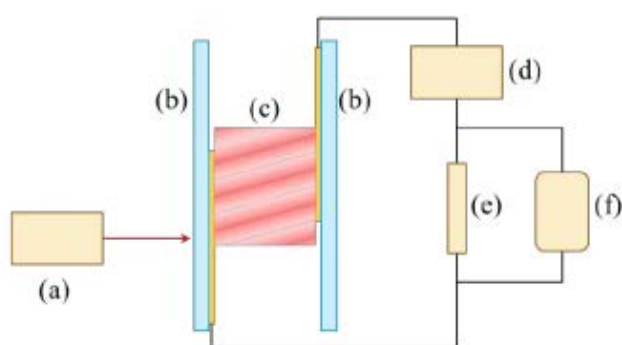
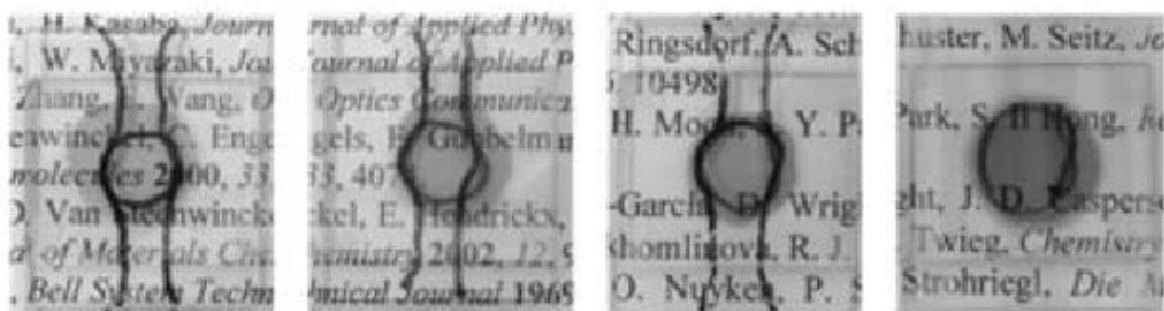


Рис. 43. Зображення реальних зразків з різними композиціями, а також вимірювальна ПК установка; а) лазерне джерело, б) скло з покриттям ІТО, в) зразок, г) джерело високої напруги, е) резистор навантаження, ф) електрометр [20]

Для вимірювання σ_r зразок спочатку освітлюється протягом декількох хвилин, після чого прикладається E , і струм встановлюється в стаціонарний стан. Дані аналізують за допомогою (15). З даних σ_r можна визначити внутрішню, генеруючу заряд, квантову ефективність, Φ , композиту за допомогою рівняння:

$$\Phi = \frac{N_{cc}}{N_{ph}} = \frac{\sigma_p hcE}{Ie\lambda\alpha_\lambda d}, \quad (19)$$

де N_{cc} - кількість носіїв заряду, що генеруються на одиницю об'єму, N_{ph} - кількість фотонів, поглинених на одиницю об'єму, h - константа Планка, c - швидкість світла, d - товщина зразка, I - інтенсивність, e - фундаментальна одиниця заряду.

Двохпроменеве з'єднання (ТВС). Асиметричний перехід енергії між двома падаючими пучками в експерименті ТВС забезпечує суттєвий засіб дослідження роботи PR нового матеріалу. На рис. 6 (а) показаний експеримент ТВС. Полімерний композит поміщають між двома оксидами олова індію (ІТО), провідними, прозорими скляними пластинами. Товщина полімерної плівки зазвичай становить близько 100 мкм. Оптичні пучки I_1 і I_2 входять в PR композит і створюють нелокальну дифракційну решітку. Це явище є абсолютно унікальним для PR-решіток завдяки їх нелокальним характеристикам, які виражаються як ненульовий фазовий зсув між оптичною інтерференційною картиною та решіткою. Внаслідок ненульового фазового зсуву, дифраговані пучки I_1 і I_2 інтерферують або руйнують один одного. В результаті один промінь отримує енергію за рахунок іншої. Коефіцієнт посилення ТВС, Γ , знаходиться через експериментально виміряні величини γ і β :

$$\Gamma = [\ln(\gamma\beta) - \ln(\beta + 1 - \gamma)]/L, \quad (20)$$

де β - відношення інтенсивності запису пучка перед зразком, а γ - відношення інтенсивності пучка, що посилюється з і без пучка накачування, і L - довжина взаємодії, задана як:

$$L = \frac{d}{\cos\theta}. \quad (21)$$

тут d - товщина зразка, а θ - внутрішній кут променя, що посилюється.

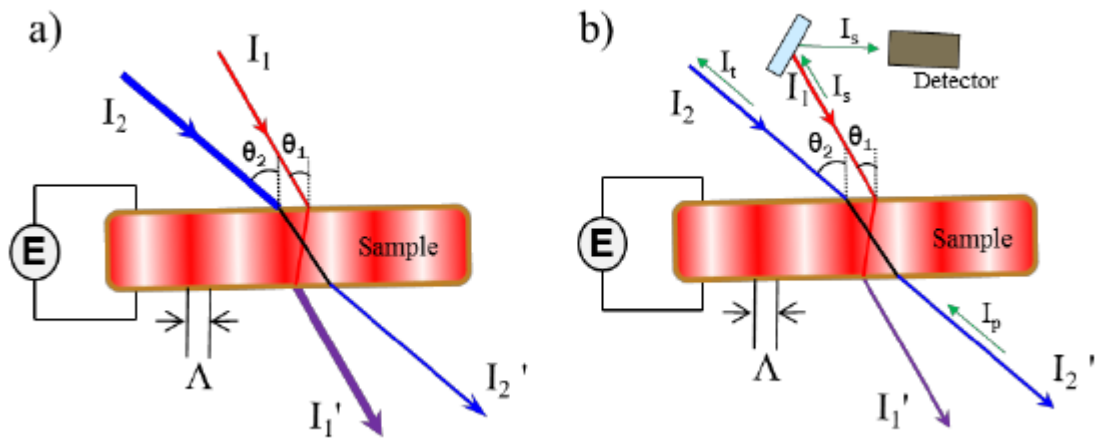


Рис. 44. Архітектура експерименту а) двопроменві зв'язки, б) тимчасово вироджена чотирехвильова інтерференція [20]

Коефіцієнт ТВС виражається як:

$$\Gamma = \Gamma_0 \sin \Phi_{ps}, \quad (22)$$

де Φ_{ps} - фазовий зсув між ESC і шаблоном освітлення;

$$\Gamma_0 = \frac{4\pi\Delta n}{\lambda m_d}. \quad (23)$$

Тут m_d - глибина модуляції інтерференційної картини і виражається як:

$$m_d = \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta}. \quad (24)$$

З (22) можна зробити висновок, що коли фазовий зсув $\pi/2$, асиметрична передача енергії між двома падаючими пучками буде максимальною. Іншими

словами, при $\Phi = 0$ голограма перебуває у фазі з інтерференційною картиною і відсутня асиметрична передача енергії між двома падаючими пучками.

Час розв'язаного випромінювання з чотирьох хвиль (DFWM)

Як показано на рис. 44 (b), методика DFWM аналогічна техніці ТВС, за винятком того, що записуючі промені зазвичай р-поляризовані для ТВС і s-поляризовані для DFWM. Інша відмінність передбачає наявність р-поляризованого зонда (зчитування) в експерименті DFWM, який протидіє одному з записуючих променів і частково дифрагується з ґратки, створеної двома записуючими променями. DFWM використовується для кількісної оцінки дифракційної ефективності, PR матеріалу. Оскільки пробний промінь легко контролюється фотоприймачем, інтенсивність дифракційного променя може бути виміряна як функція часу і прикладеного електричного поля.

Внутрішню ефективність дифракції, η_{int} , можна виразити як:

$$\eta_{ext} = \frac{I_s}{I_p}. \quad (25)$$

Тут ϵ інтенсивність сигнального пучка і I_p - інтенсивність пробного пучка. Внутрішню ефективність дифракції, η_{int} , можна виразити як:

$$\eta_{int} = \frac{I_s}{I_{p'}}, \quad (26)$$

де, $I_{p'}$ - передана частина пробного пучка без E .

З урахуванням Γ і η_{int} , для серії пристроїв PR можна розрахувати величину Φ_{ps} за допомогою рівняння:

$$\Phi_{ps} = \sin^{-1} \left\{ \Gamma L / \left[(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \sin^{-1} \sqrt{\eta_{int}} \right] \right\}. \quad (27)$$

Оскільки Φ_{ps} стосується вільних від відстані носіїв заряду, що пройшли до того, як вони потрапили в пастку, це також дає змогу зрозуміти про наявність пасток, достатньо глибоких для іммобілізації таких зарядів.

Голографічні дисплеї 3D PR. Оскільки 3D голографічна телеприсутність була зображена в оригінальному епізоді Нової Надії "Зоряних воєн" в 1977 році, динамічна голографія в реальному часі привернула значний суспільний інтерес. Проте, відсутність обчислювальних можливостей і знання механізму PR

призвело до того, що 3D голографія розглядалася як технологія, яка обмежена «Sci-Fi». Продуктивність голографічних дисплеїв PR значною мірою залежить від дифракційної ефективності, швидкого τ і стійкості зображення PR-матеріалів. У 2010 році було отримано зображення «4 x 4» PR з використанням PATPD / CAAN: FDCST: ECZ: PCBM і імпульсним лазером з генерацією хвиль в 50 Гц (рис. 45) [20].



Рис. 45. PR голограми двох моделей – різнокольорові автомобілі та квіти [23]

Наступний звіт описав повнокольорову PR-голографічну візуалізацію (рис. 8 (а)) з 30 см × 15 см і тривалістю в близько 8 сек. Зображення покращилося через менший розмір голографічних елементів (хогеля). Хогель - це масив малих функціонально дифракційних вузлів для розділення голограми вертикально і горизонтально, таким чином, кожен хогель - це невелика ділянка шаблону бахроми. Автори досягли понад 2500 cd/m^2 яскравості, а трикольорова гамма перевищила стандарт HDTV (рис. 46 (b)) [23].

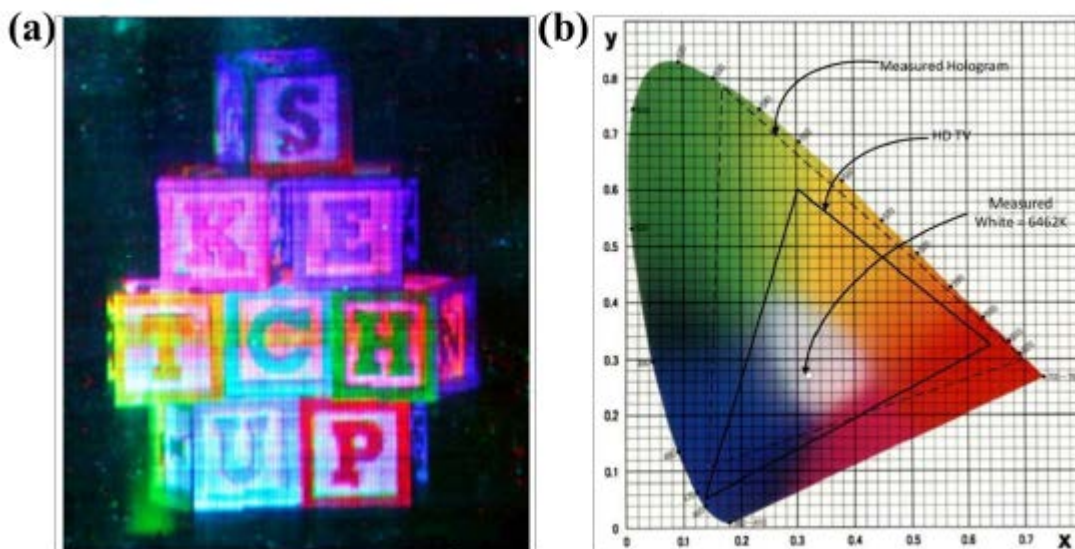


Рис. 46. (а) Повнокольорове зображення, що підтримує голографію PR (b), і порівняння колірного простору CIE [20]

Як показано на рис. 47, побудова зображення динамічної 3D-голограми починається з комп'ютерної моделі 3D. Потім цю модель нарізають на декілька площин 2D зображень, подібно до магнітно-резонансного зображення (hogel data). Дані «хогеля» повторно завантажуються через просторовий модулятор світла (SLM) в геометрії DFWM до PR-пристрою. Для практичних результатів є швидкий, τ , висока ефективність, низька робоча напруга та екологічна конструкція системи є необхідним набором умов.

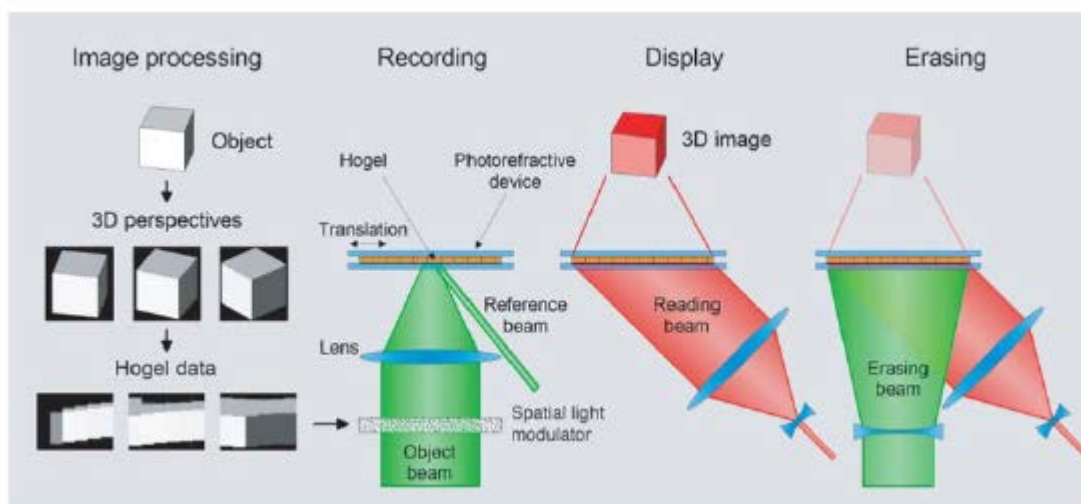


Рис. 47. Схема тривимірної голографічної системи відображення [20]

На рис. 48 і 49 показані динамічні голограми PR. Сто елементарних голограм (хогелів) реєстрували за допомогою голографічної стереограми. Отримане голографічне зображення спостерігали протягом 3 годин. Нещодавно були також представлені модифіковані PR голографічні зображення з використанням NACzE / PMMA без вторинного поля. У цьому дослідженні для отримання великої оптичної дифракції використовувався швидкий цикл між цис- і транс-ізомерами NACzE. Стереографічна техніка коротко проілюстрована на рис. 9. Зелені зони являють собою лазерні джерела безперервної хвилі, що використовується для запису, а помаранчеві області являють собою джерело лазера безперервної хвилі, що використовується для реконструкції. Зображення об'єкта було створено на дифузорі шляхом проєціювання зображення хогеля на просторовий модулятор світла (SLM). Зображення Хогеля безперервно реконструювалися в режимі реального часу. У подальшому дослідженні Tsutsumi та інші повідомили про динамічну динамічну голограму, отриману з використанням PR композиції PDAS / FDCST / ECZ / PCBM і PDAA / 7-DCST / BBP / PCBM (рис. 48) [24, 25].

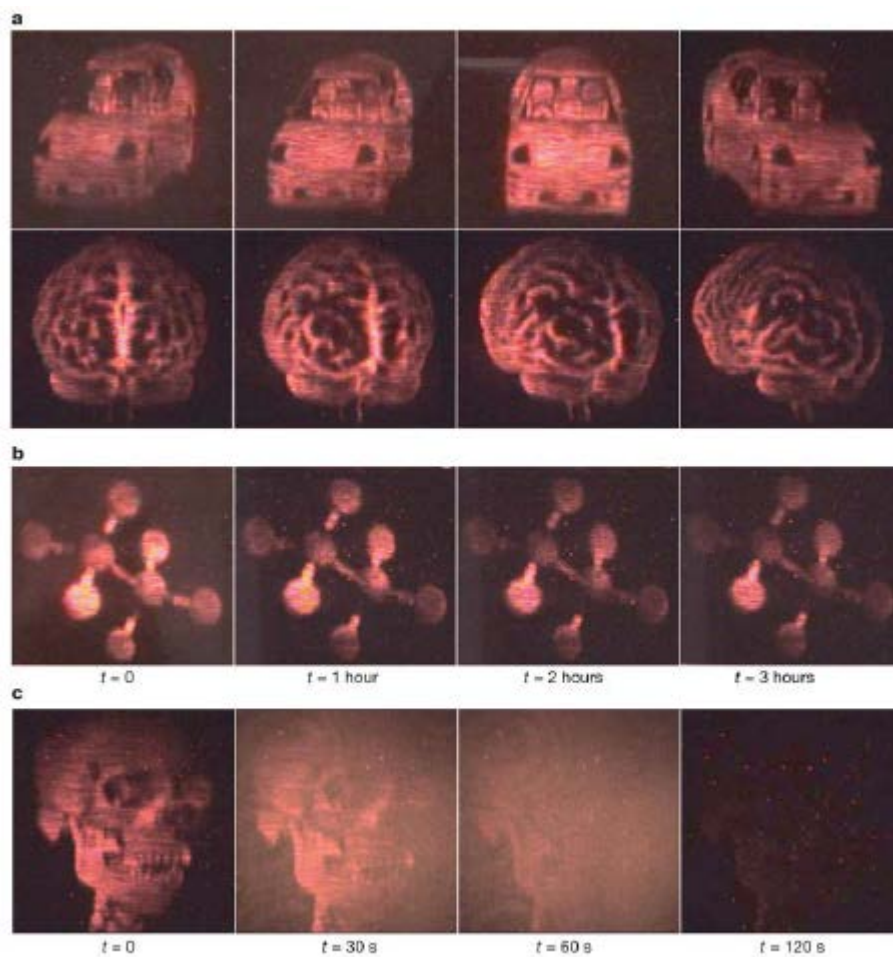


Рис. 10. Оновлений PR голографічний 3D-дисплей з використанням PATPD-CAAN: FDST: ECZ PR композиту [20].

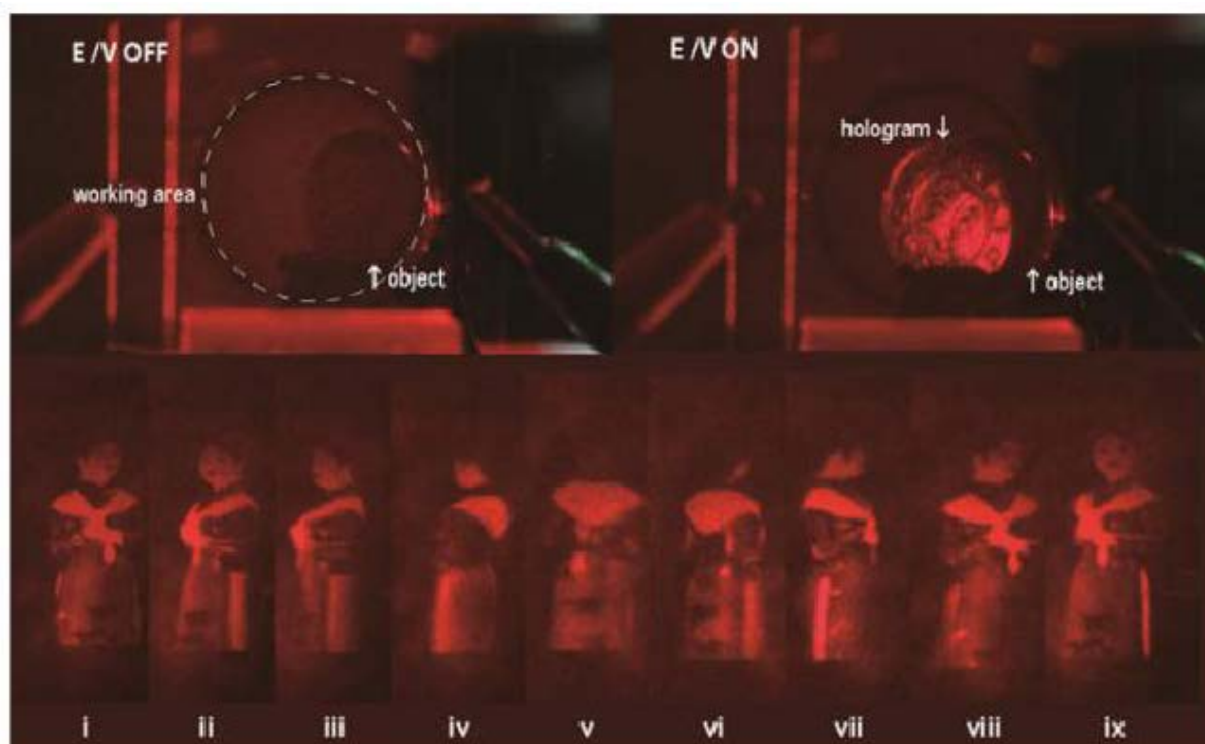


Рис. 49. Зображення динамічної голограми з композиту PDAA / 7-DCST / BBP / PCBM PR [20]

Підвищення ефективності PR. Для досягнення відеографічних голографічних зображень для практичних цілей необхідна швидкий τ . Таблиця 2 підсумовує прогрес, досягнутий в області PR-матеріалів з 2000 року. τ і ефективність PR матеріалів були, як конфліктуючі вимоги, які було важко задовольнити одночасно. Проте, оскільки мілісекундний τ і майже 100% дифракційна ефективність були досягнуті, велика кількість досліджень зосереджувалася на підвищенні реакції та ефективності органічних PR матеріалів. Нещодавно було показано, що на додаток до використання Q-точок як фотосенсибілізатора, в присутності іншого первинного фотосенсибілізатора, Q-точки можуть бути використані для посилення [26, 27].

Таблиця 1. Порівняння часу відгуку τ в різних матеріалах PR [20].

Composition	Year	Response Time, τ
LiNbO ₃ [15]	1966	300 s
QCdS:PVK:TCP:NPP [14]	1999	7.3 s
QCdTe:PVK:AODCST:ECZ [60]	2007	117 ms
PbS:PVK:AODCST:ECZ [29]	2014	40 ms
C ₆₀ :PVK:7-DCST:BBP [61]	1998	5 ms
C ₆₀ :PTPDAE:EHDNB [62]	2002	1 ms
PC ₆₁ BM:Alq ₃ :PTAA:PDCST:TAA [31]	2015	860 μ s
C ₆₀ :PbS:PATPD:PVK:7-DCST:ECZ [30]	2016	399 μ s

Коли Q-точки були включені як фотосенсибілізатор, використовуючи нерезонансний підхід, отримали 82% внутрішньої дифракційної ефективності, 211 см⁻¹ коефіцієнтів ТВС і $\tau = 34$ мс спостерігали за допомогою композиту PbS (Q-dots) / PVK / AODCST / ECZ. У подальшому дослідженні Q-точки використовувалися для посилення τ , які діють, як вид транспортування заряду в особливості з C₆₀, який використовується, як фотосенсибілізатор. У C₆₀: PbS: DMTPD: PVK: ECZ PR, 72% внутрішньої дифракційної ефективності, 500 см⁻¹ коефіцієнти ТВС і $\tau = 399$ мкс були повідомлені для експерименту DFWM. Примітно, що суб-мілісекунди τ були досягнуті без втрати ефективності PR. Хоча результати були отримані при відносно високому електричному полі (100 В/мкм), що важливо, включені Q-точки не діяли як значні пастки. Використання інших матеріалів як фотосенсибілізаторів та/або зміна транспортних видів також є успішним. Описано і повідомлено, що функціональні Q-точки CdSe з TPD або TOPO показують потенціал [28, 29].

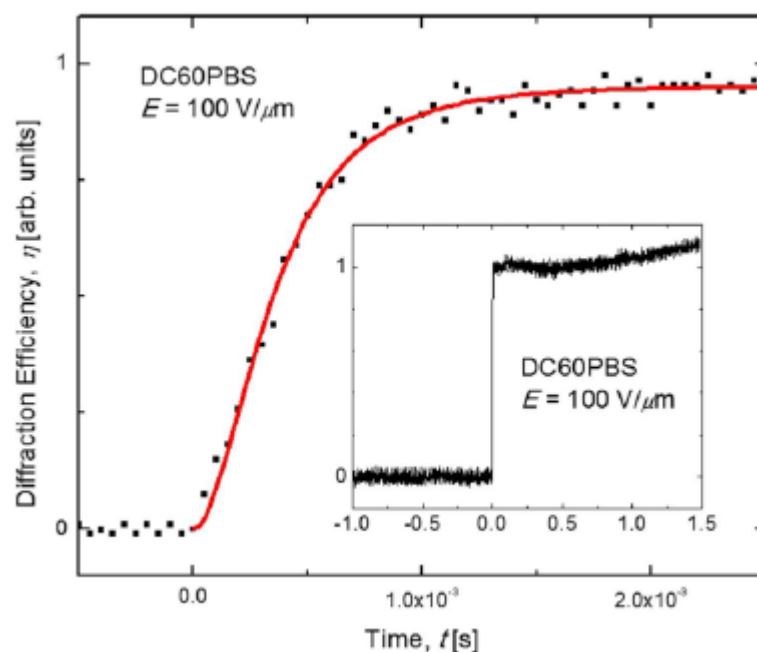


Рис. 50. Часова еволюція дифрагованого пробного пучка в експерименті DFWM при $E = 100$ В/мкм. Зразок містив С60 (головний фотосенсибілізатор) з Q-точками (PbS в якості другого фотосенсибілізатора). [28, 29]

Нещодавно було отримано, $\tau = 350$ мкс для ТВС і $\tau = 860$ мкс для DFWM були досягнуті з використанням системи PC61BM: Alq3: PTAA: PDCST: TAA в умовах безперервної довжини хвилі - 532 нм. Для підвищення ефективності дифракції використовували прямокутне електричне поле (60 В/мкм, 100 Гц). Невелика кількість (1 мас. %) Al3q також було додано до системи, що призвело до поліпшення стійкості по відношенню до діелектричного пробою внаслідок придушення фотоструму (рис. 50). Цей PR композит мав дифракційну ефективність 83% і коефіцієнт ТВС 109 см^{-1} [30].

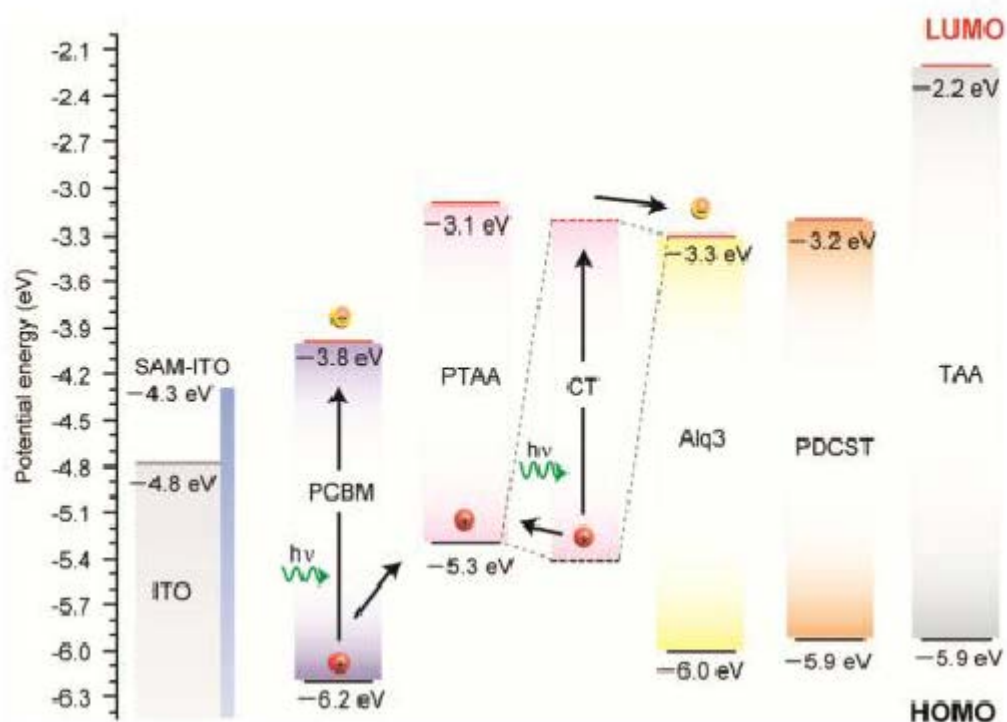


Рис. 51. Діаграма енергетичного рівня PC₆₁BM: Alq₃: PTAA: PDCST: TAA PR композиту [30].

Таблиця 2. Фотосенсибілізатори, фотопровідники, пластифікатори та хромофори NLO, що використовуються в описаних органічних композиціях з PR [20]

Sensitizers	C ₆₀ , TNF*, TNFM*, PC ₆₁ BM*, PC ₈₅ BM*, ZnPc, SiPc, DiPBI*, PbS
Polymers	PVK, PDAS*, PDAA*, PATPD*, PTAA*, Cz:DCDHF copolymer*, PF6-TPD*, poly-TPD
Plasticizers	BBP*, ECZ*, TAA*, TCP*
NLO chromophores	DMNPAA*, H1*, PDCST*, 7-DCST*, FDCST*, DEANST*, Dc*, P-IP-DC*, NPEMI-A*

* TNF = 2,4,7-trinitro-9-fluorenone, TNFM = (2,4,7-trinitro-9-fluorenylidene)malononitrile, PC₆₁BM = [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester, PC₈₅BM = [6,6]-phenyl-C₈₅-butyric acid methyl ester, DiPBi = diperylene bisimide, PDAS = poly(4-diphenylamino)styrene, PDAA = poly(4-(diphenylamino)benzyl acrylate), PATPD = poly(acrylic tetraphenyldiaminobiphenyl), PTAA = poly(triarylamine), Cz:DCDHF = carbazole:dicyanomethylenedihydrofuran, PF6-TPD = poly(N,N'-bis(4-hexylphenyl)-N'-(4-(9-phenyl-9H-fluorenyl)phenyl)-4,4'-benzidine), BBP = butyl benzyl phthalate, ECZ = N-ethylcarbazole, TAA = triarylamine, TCP = Tricresyl phosphate, DMNPAA = 2,5-dimethyl-(4-p-nitrophenylazo)anisole, H1 = green fluorescent protein, PDCST = 4-piperidinobenzylidenemalononitrile, 7-DCST = 4-(azepan-1-yl)benzylidenemalononitrile, FDCST = 4-homopiperidino-2-fluorobenzylidene malononitrile, DEANST = 4-(N, N-diethylamino)-β-nitrostyrene, Dc = 4-[(4-(diethylamino)-2-hydroxybenzylideneamino]benzonitrile, P-IP-DC = 2-{3-[(E)-2-(piperidino)-1-ethenyl]-5,5-dimethyl-2-cyclohexenylidene}-malononitrile, NPEMI-A = 2-methylindole, 3-[2-(4-nitrophenyl)ethenyl]-1-allyl-2-methylindole

Рис. 52. Розшифрування аббревіатур органічних композицій [20]

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

4.1 Створення цифрового тривимірного зображення за допомогою програмного забезпечення 3Ds Max

Для початку був створений контейнер, в якому відбуваються процеси горіння:

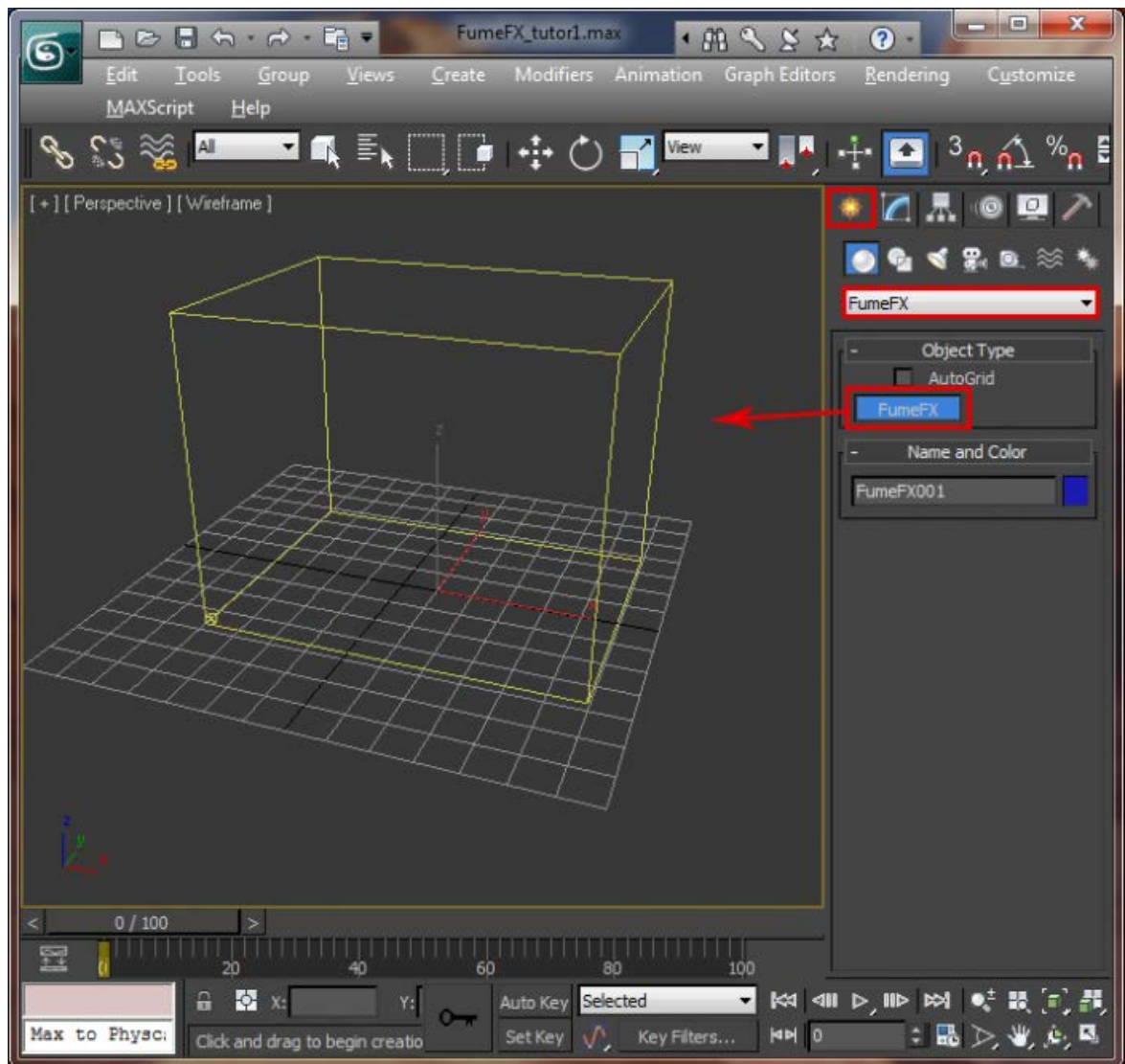


Рис. 53

Для моделювання процесу горіння, створена система часток Particle Flow. Ця система живить полум'я продуктами окислення – спеціальними частками. Вона потрібна для моделювання процесу окислення і відповідно горіння.

Після послідовності модифікацій цієї системи отримано такий результат:

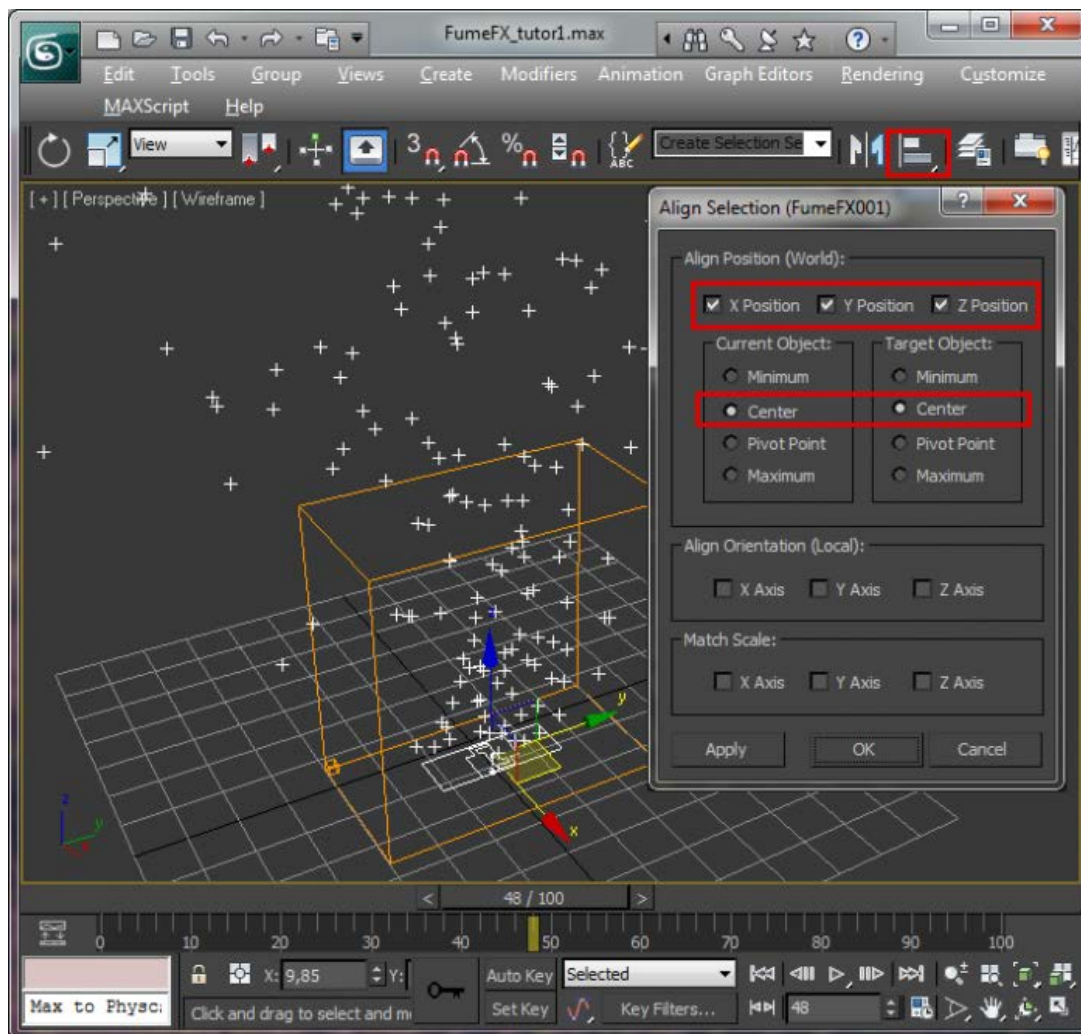


Рис. 54

Для забезпечення потрібної якості, анімація складається з 400 кадрів.

Для створення, приближеного до реальності, вогню був використаний тип джерела Particle Src.

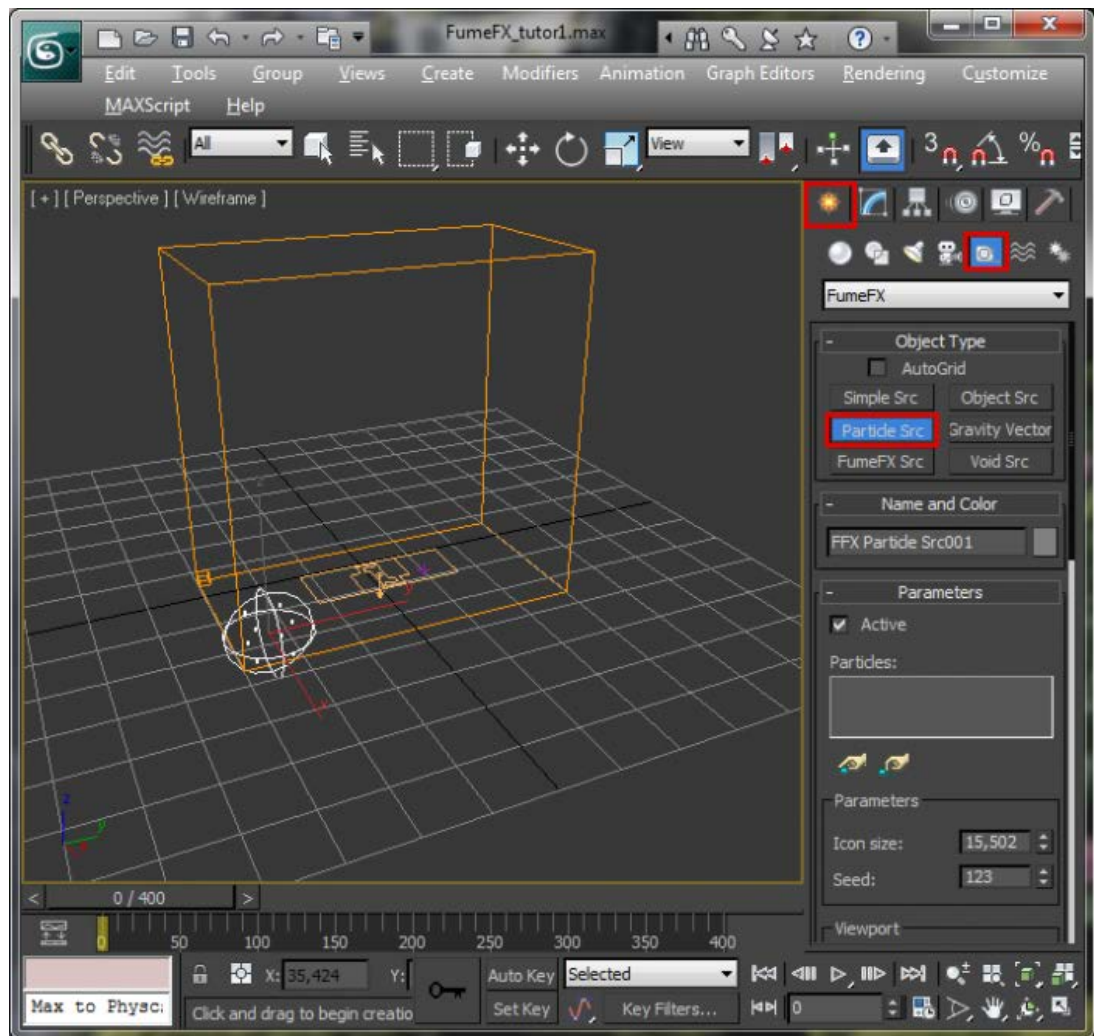


Рис. 55

Після послідовності модифікацій джерела вогню, отримано процес симуляції створення анімації полум'я:

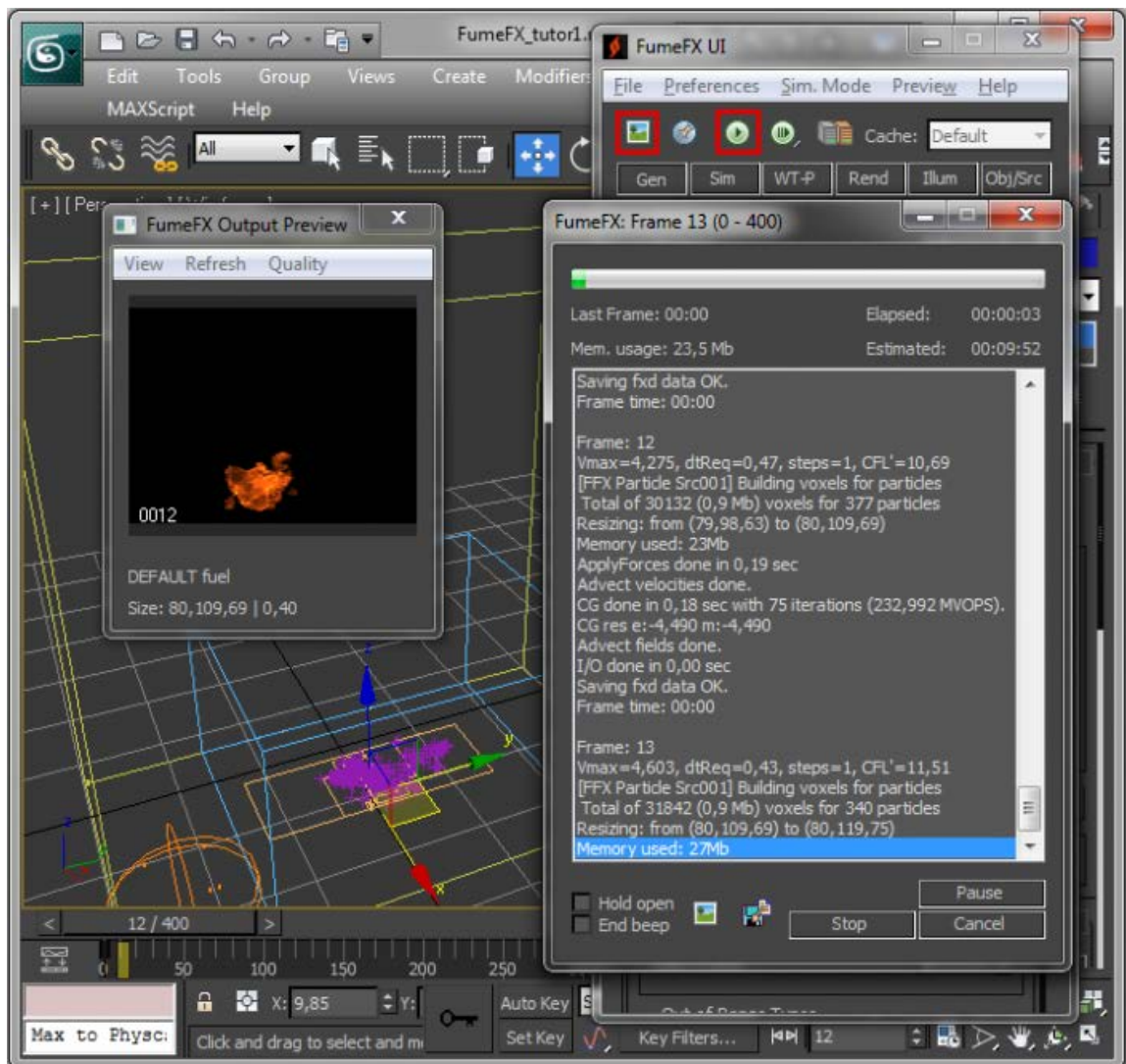


Рис. 56

Було відредактовано основні параметри полум'я - анімації, такі як – дим, температура, колір, інтенсивність, паливо та інші.

Також було встановлені параметри тіней та освітлення для анімативної сцени:

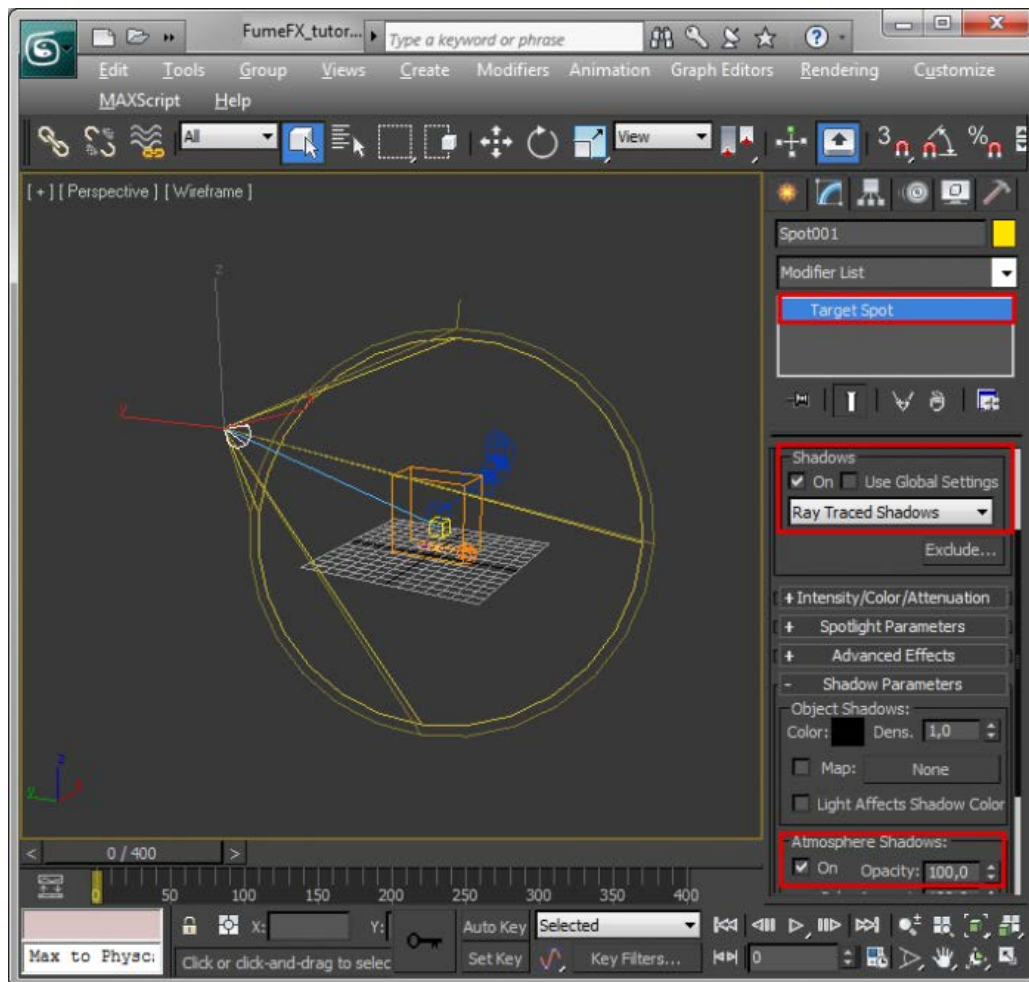


Рис. 57

Після процесу симуляції була отримана така анімація (показані деякі кадри анімації):



Рис. 58

4.2 Створення голограмного відео на основі анімації полум'я

Для створення відео – анімації було вибрано програмне середовище Movavi Video Suite.

Для відображення цього відео була створена проекторна піраміда, яка зображена на рис.59.

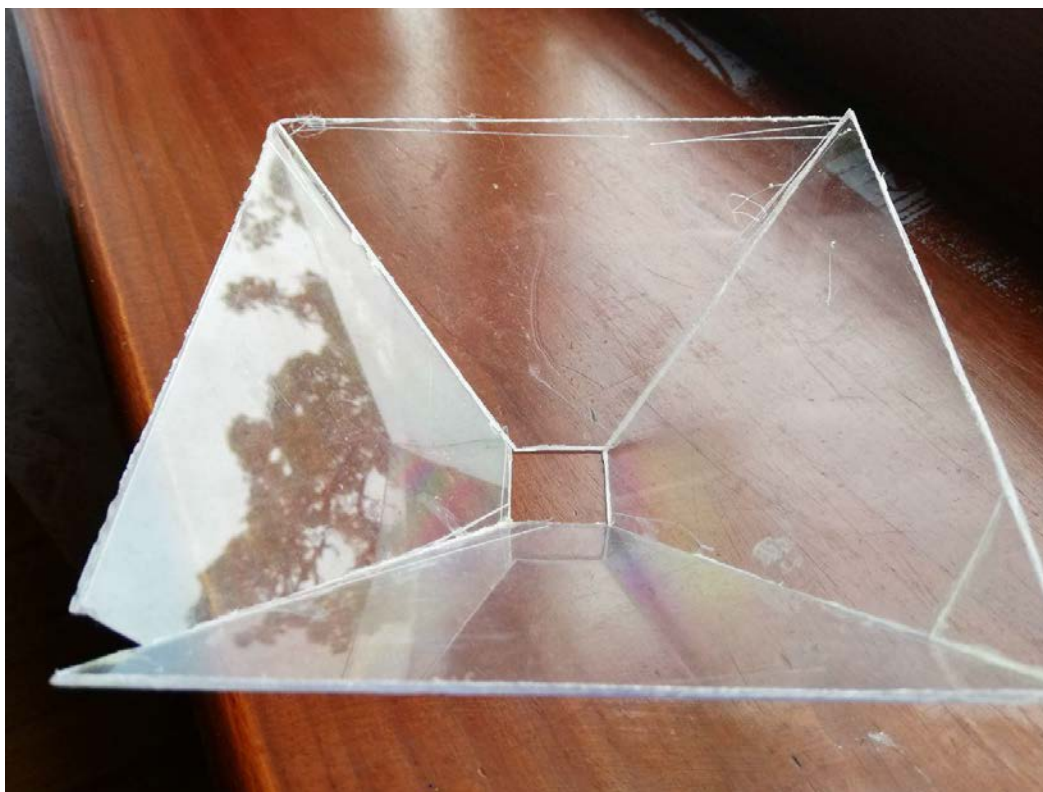


Рис.59

Для того, щоб відобразити псевдо-голограму потрібно створити відео, яке складається з 4 частин, де на кожній частині записаний вигляд анімації з різних сторін або вигляд анімації з одної сторони, яка показується на 4 сторонах.

В цьому розділі будуть представлені такі відео-анімації:

- 1) Кожна сторона – це вигляд анімації з різних боків.
- 2) Кожна сторона – це один і той самий вигляд анімації (одна сторона)
- 3) Кожна сторона – це 4 вигляди з різних сторін анімації, які мають деяку прозорість та накладені одна на одну.

- 1) Після послідовності модифікацій основної анімації та конвертації їх у відео маємо такий результат:

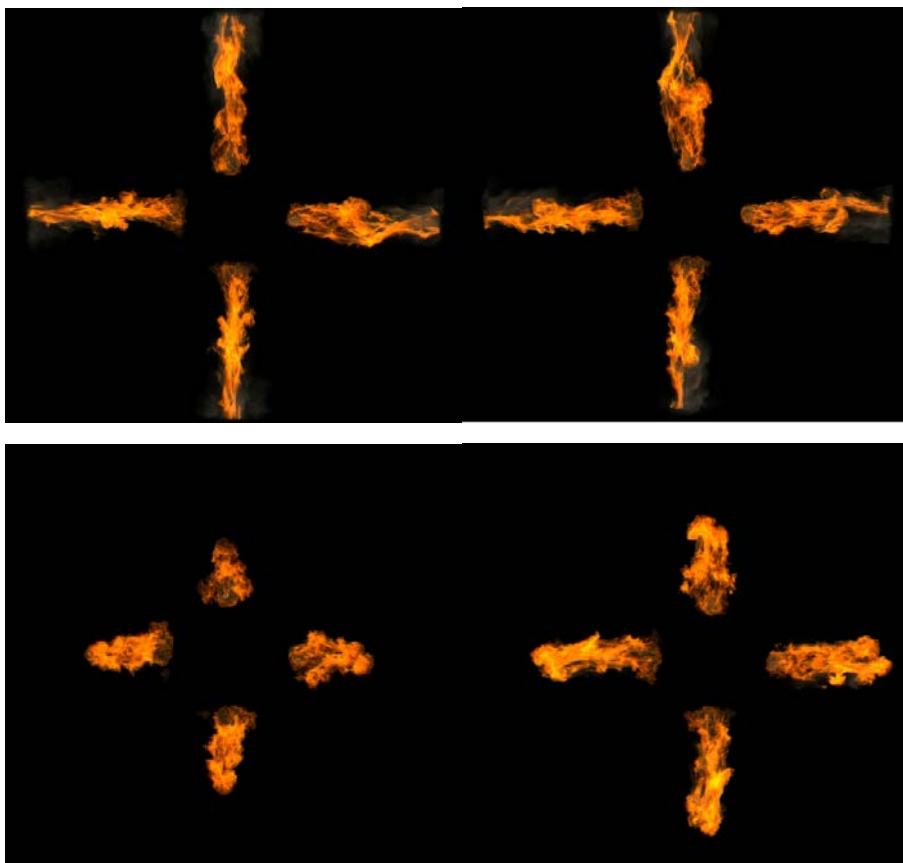
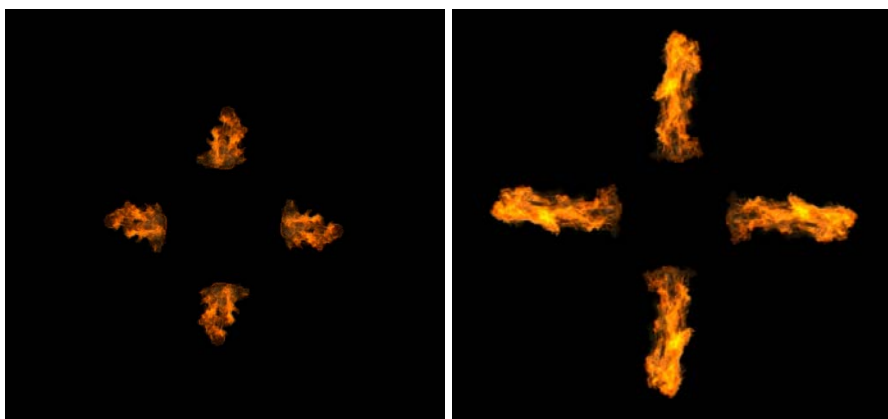


Рис.60. Скріншоти відео в різних позиціях; Кожна частина відео – це вигляд з кожної сторони анімації

- 2) Після послідовності модифікацій основної анімації та конвертації їх у відео маємо такий результат:



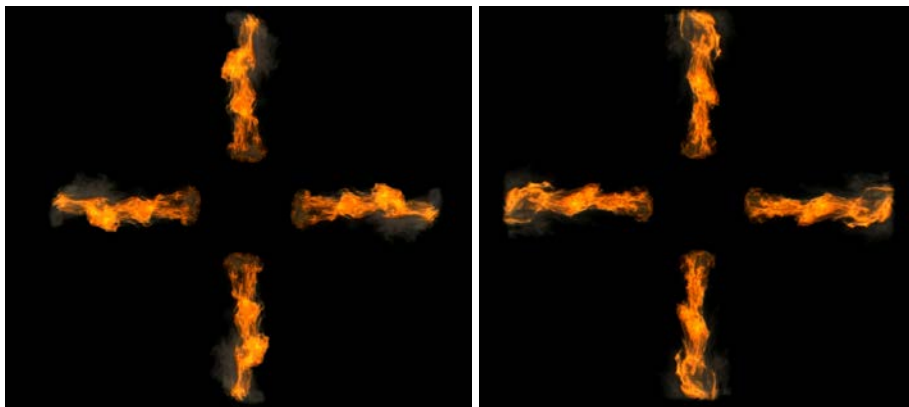


Рис.61. Скріншоти відео в різних позиціях; Кожна частина відео – це вигляд з однієї сторони анімації

- 3) Після послідовності модифікацій основної анімації та конвертації їх у відео маємо такий результат:

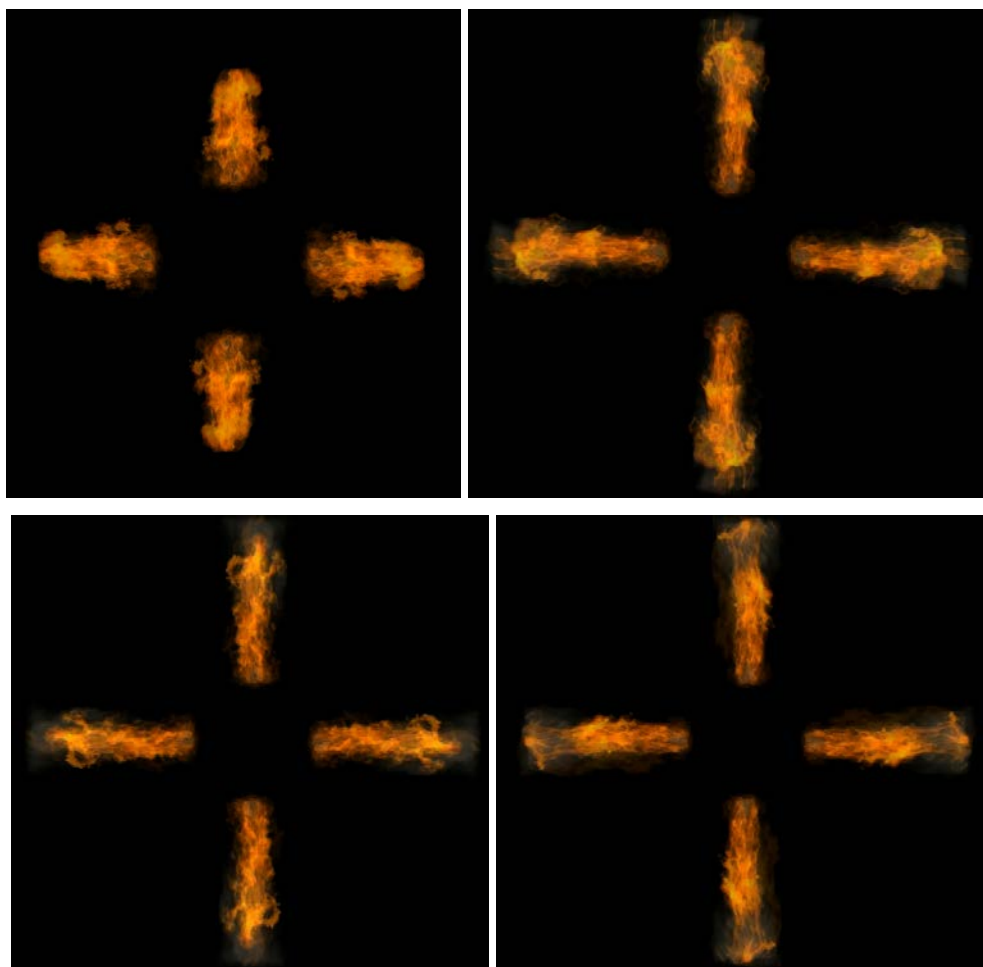


Рис. 62. Скріншоти відео в різних позиціях; Кожна частина відео – це 4 вигляди накладені один на один; Задній вигляд не прозорий, всі інші види мають прозорість 50 %

4.3 Псевдо-голограма в трьох різних форматах

1) Кожна сторона – це вигляд анімації з різних боків.



Рис. 63

2) Кожна сторона – це один і той самий вигляд анімації (одна сторона)



Рис. 64

- 3) Кожна сторона – це 4 вигляди з різних сторін анімації, які мають деяку прозорість та накладені одна на одну.



Рис. 65

ВИСНОВКИ

В роботі було продемонстроване тривимірне зображення анімації полум'я в нелінійному середовищі та проаналізовані основні методи та технології створення голограм у різних середовищах при різних умовах для різних цілей. Були описані методи роботи цих технологій та їх перспективи.

Отримана анімація була створена за допомогою програмного забезпечення 3Ds Max. Всі відео були зкомпоновані за допомогою програмного забезпечення Movavi Video Suite. Самі ж голограми були відображені за допомогою обрізаної піраміди пластику та планшету. Були показані голограми: в яких всі 4 сторони мають один напрям, в яких всі 4 сторони мають погляд з 4 різних сторін (дзеркально розташованих).

Динамічна голографія в реальному часі протягом десятиліть привертає значний суспільний інтерес. Проте, відсутність обчислювальних здібностей і знання механізму PR призвели до того, що вона розглядалася як неможлива технологія Sci-Fi. Проте значні зусилля, спрямовані на розуміння механізму PR, призвели до реального практичного успіху. Ефект PR починає з'являтися з освітленням PR матеріалу. Фотосенсибілізатор генерує вільні носії заряду, а потім фото-генеровані отвори переміщуються в зарядово-транспортний матеріал, де вони можуть мігрувати під впливом E в темні смуги освітленого зразка. Носії заряду стають захопленими в темних смугах, і, нарешті, отриманий ESC модулює n через додавання хромофору NLO. Явища PR були широко досліджені з моменту його першого виявлення в 1966 році, і ці дослідження привели до чудового розуміння молекулярної архітектури органічних PR матеріалів, які дозволили розробити нові PR композити швидше і краще. Завдяки легкості виготовлення та гнучкості дизайну, органічні PR матеріали стають фокусом у цій сфері. Незважаючи на період повільного прогресу протягом останнього десятиліття, нещодавно було зареєстровано значні успіхи, включаючи тривимірну голограму 3D PR, а також суб-мілісекундний τ , який досягнутий без втрати ефективності PR. Для прориву

сучасних досліджень в області голограм PR необхідно розробити ефективні «не фулеренні» акцептори. Широкий спектральний діапазон діючих «не фулеренних» акцепторів робить великий вибір компонентів у PR композитах. Крім того, на виробництві потрібно більше досліджень для розробки великої площі PR-пристроїв за допомогою «рулонного» процесу для промислового виробництва. Додатковими цілями стануть «екологічна» хімія та довгострокова стабільність PR-пристроїв. Відповідно до нещодавнього значного прогресу в PR-матеріалах, передбачається, що швидкий 3D-голографічний дисплей може бути комерційним у найближчому майбутньому.

Було створено анімацію в програмному середовищі 3Ds Max, яка потім використовувалась для створення відео-анімації в програмному середовищі Movavi Video Suite. Це відео було використане для спостереження псевдо-голограми за допомогою зрізаної піраміди, яка була показана в роботі.